



TUGAS AKHIR - TM 184835

**ANALISIS *FATIGUE OFFSHORE* *FIXED*
PLATFORM PEDESTAL-MOUNTED *CRANE*
BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA**

DEANNA ANNISA DEWI
NRP. 02111440000190

Dosen Pembimbing
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - TM 184835

***ANALISIS FATIGUE OFFSHORE FIXED
PLATFORM PEDESTAL-MOUNTED CRANE
BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA***

DEANNA ANNISA DEWI
NRP 02111440000190

Dosen Pembimbing
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - TM 184835

FATIGUE ANALYSIS OF OFFSHORE FIXED PLATFORM PEDESTAL-MOUNTED CRANE BASED ON FINITE ELEMENT METHOD

DEANNA ANNISA DEWI
NRP 02111440000190

Academic Supervisor
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019

ANALISIS *FATIGUE OFFSHORE FIXED PLATFORM*
***PEDESTAL-MOUNTED CRANE* BERBASIS METODE**
ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

DEANNA ANNISA DEWI

NRP. 0211 14 40000 190

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Julendra B. Ariatedja, MT. NIP. 196807061999031004 (Pembimbing)
2. Achmad Syaifudin, ST, M. Eng, PhD NIP. 197909262005011001 (Penguji I)
3. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA NIP. 196508101991021001 (Penguji II)
4. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT. NIP. 197004121997032003 (Penguji III)

SURABAYA
JANUARI, 2019

ANALISIS FATIGUE OFFSHORE FIXED PLATFORM PEDESTAL-MOUNTED CRANE BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA

Nama : Deanna Annisa Dewi
NRP : 02111440000190
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Ir. Julendra B. Ariatedja, MT.

ABSTRAK

Perkembangan eksplorasi dan produksi hidrokarbon menjadi salah satu alasan tersebarnya anjungan lepas pantai yang luas dan pesat dengan tujuan pembangunan yang berbeda-beda. Untuk menunjang proses produksi pada anjungan lepas pantai diperlukan alat pemindah bahan, salah satunya yaitu Pedestal-mounted Crane. Crane adalah alat yang digunakan untuk membantu proses pemindahan bahan secara horizontal. Pada pengoperasiannya, crane pada anjungan lepas pantai mengalami pembebanan yang bersifat siklis sehingga dapat menyebabkan struktur crane mengalami kelelahan. Pembebanan tersebut diantaranya beban angkat dan beban lingkungan. Sehingga, perlu dilakukan analisis pada crane pedestal mengenai seberapa besar beban-beban tersebut berpengaruh terhadap kelelahan yang terjadi pada crane serta umur kelelahannya.

Pemodelan crane pedestal dilakukan dengan bantuan software solid modeling dan analisis kelelahan lokal dilakukan pada crane bagian pedestal dengan menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH) dan bantuan software finite element. Sebagai tahap validasi, dilakukan perbandingan nilai reaksi gaya dan momen pada tumpuan crane pedestal antara hasil simulasi dengan hand-calculation. Selanjutnya dilakukan simulasi statis dengan kondisi batas pada bagian top ring dari crane pedestal dengan tumpuan fixed support untuk mendapatkan nilai Maximum Equivalent Stress (von-Mises) sebagai dasar

pembebanan siklis pada simulasi dinamis. Kemudian dilakukan simulasi dinamis dari dua pembebanan, yaitu beban angin dengan variasi kecepatan angin dan beban operasional dengan variasi radius pengangkatan, untuk mengetahui titik kritis serta umur kelelahan struktur.

Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa beban operasi memiliki pengaruh paling besar terhadap kelelahan struktur crane pedestal dengan kontribusi sebesar 80.7202%, disusul beban angin dengan kontribusi sebesar 19.2817%. Sedangkan pergerakan anjungan terpancang yang terjadi akibat beban gelombang tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kelelahan struktur crane pedestal. Selain itu, didapat umur kelelahan crane pedestal yaitu 96.54 tahun atau mendekati 5 kali umur desain crane. Hal ini menunjukkan bahwa crane layak untuk beroperasi di anjungan terpancang yang didesain untuk beroperasi selama 20 tahun dengan umur kelelahan 100 tahun.

Kata kunci: Analisis Fatigue Life, Metode Elemen Hingga, Offshore Fixed Platform, Pedestal-mounted Crane.

FATIGUE ANALYSIS OF OFFSHORE FIXED PLATFORM PEDESTAL-MOUNTED CRANE BASED ON FINITE ELEMENT METHOD

Name : Deanna Annisa Dewi
NRP : 02111440000190
Departement : Teknik Mesin
Supervisor : Ir. Julendra B. Ariatedja, MT.

ABSTRACT

The development of hydrocarbon exploration and production provided a vital boost to the design of a multitude purpose offshore structures and their spread. To facilitate production processes held in offshore platforms, material handling equipment is needed, and an offshore pedestal-mounted crane is one of them. Crane is used for transferring materials horizontally. While operating, an offshore-platform crane experiences cyclic loads that cause fatigue to the structure. These loads are environmental and operational loads. It is important to analyze crane's pedestal on how much these loads can affect the fatigue and its life.

The structure modeling is done using solid modeling software, and a local fatigue analysis on the crane pedestal is done based on Finite Element Method (FEM) using finite element software. As the validation process, the value of force and moment reaction at the crane pedestal's fixed support from the simulation is compared to a hand-calculation. A static simulation is done with fixed support on the pedestal's top ring as the boundary condition to obtain the value of maximum equivalent stress (von-Mises) as the dynamic simulation's basis. Next, dynamic simulations of two loadings are done, that are wind loads with a variation of wind velocities and operational loads

with a variety of working radius, to identify the structure's critical points and fatigue life.

The result of this research shows that operational loads make the biggest contribution to crane's fatigue life with a percentage of 80.7202%, followed by wind loads with a percentage of 19.2817%. The fixed platform's motion caused by wave loads has no significant effect on the crane's fatigue life. The crane pedestal's fatigue life is 96.54 years or approximately 5 times bigger than the crane's design life. This indicates that the crane is feasible to be used in offshore platforms designed for 20 years with a fatigue life of 100 years.

Keywords: Fatigue Life Analysis, Finite Element Method, Offshore Fixed Platform, Pedestal-mounted Crane.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbil'alamin. Puji syukur penulis panjatkan kehadirat ALLAH SWT atas limpahan rahmat, hidayah, rizki dan izin-Nya sehingga penyusunan laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penyusunan laporan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat akademis untuk kelulusan mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari dalam penyusunan laporan tugas akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri, melainkan dengan adanya dukungan, bimbingan dan dorongan dari berbagai pihak, baik secara langsung, maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orangtua Bapak Riza Alirahman dan Ibu Listiani Dewi yang tak henti mendoakan penulis, serta adik kandung Normandarsa Rahman yang selalu menemani dengan penuh hiburan dan canda tawa hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan bahagia.
2. Bapak Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan nasehat kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Achmad Syaifudin, ST, M.Eng., PhD., Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA, dan Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT., selaku dosen penguji.
4. Ibu Dinny Harnany, ST, M.Sc, selaku dosen wali.
5. Seluruh Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Mesin FTI ITS.
6. Gandung Gistianto Suhartono yang tak henti memberikan perhatian dan kasih sayang serta kesabarannya dalam menghadapi penulis yang suka marah saat mengerjakan tugas akhir ini.
7. Ayunisa, Pingkan, dan Riri selaku teman berbagi cerita sekaligus sahabat penulis; Lindam, Ben, dan Maul selaku

teman seperjuangan dan seimbang tugas akhir; Imang, Rifai, dan seluruh rekan-rekan Laboratorium Mekanika Benda Padat yang senantiasa membantu kelancaran tugas akhir penulis.

8. Seluruh rekan-rekan Teknik Mesin FTI ITS 2014 M57.
9. Seluruh keluarga Mesin Music Club yang telah membulatkan cita-cita penulis untuk menjadi musisi.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk penyempurnaan laporan tugas akhir ini. Dan penulis meminta maaf apabila terdapat kalimat yang kurang berkenan pada laporan tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan seluruh pembaca untuk kemajuan yang lebih baik. Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih.

Surabaya, Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori	11
2.2.1 Anjungan Lepas Pantai.....	11
2.2.2 Offshore Pedestal-mounted Crane.....	16
2.2.3 Pembebanan.....	19
2.2.4 Beban Gelombang	20
2.2.5 Beban Angin.....	28
2.2.6 Beban Operasional	30
2.2.7 Momen Gaya	32
2.2.8 Kelelahan.....	32
2.2.9 Metode Elemen Hingga.....	39
BAB III METODE PENELITIAN.....	43
3.1 Prosedur Penelitian.....	43
3.2 Diagram Alir.....	43
3.3 Studi Literatur.....	45
3.4 Pengumpulan Data.....	46
3.4.1 Data Struktural	46
3.4.2 Data Lingkungan	51
3.5 Pembebanan.....	53
3.5.1 Perhitungan Beban gelombang.....	53
3.5.2 Perhitungan Beban Angin	55

3.5.3 Perhitungan Beban Operasional	62
3.6 Simulasi Pembebanan dan Analisis Kelelahan	66
3.6.1 Karakteristik Material	66
3.6.2 Pemodelan Geometri	69
3.6.3 Diskritisasi (<i>Meshing</i>)	70
3.6.4 Kondisi Batas	76
3.6.5 Kondisi Pembebanan	76
3.6.6 Analisis	77
3.7 Validasi	78
3.8 Pelaksanaan Penelitian	85
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	87
4.1 Analisis Kelelahan	87
4.1.1 Analisis Kerusakan akibat Beban Gelombang	87
4.1.2 Analisis Kerusakan akibat Beban Angin	87
4.1.3 Analisis Kerusakan akibat Beban Operasional <i>Crane</i>	91
4.1.4 Analisis Kelelahan Total	96
4.2 Kontribusi Pengaruh Pembebanan	97
4.3 Komparasi Hasil Analisis Kelelahan Struktur <i>Crane</i> <i>Pedestal</i>	98
4.4 Pembahasan	99
4.4.1 Komparasi Pembebanan Gelombang	99
4.4.2 Hasil Simulasi Beban Angin	103
4.4.3 Hasil Simulasi Beban Operasional	105
BAB V	111
5.1 Kesimpulan	111
5.2 Saran	112
5.3 Keterbatasan Penelitian	112
DAFTAR PUSTAKA	xviii
LAMPIRAN	xxii
BIODATA PENULIS	xxiv

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Anjungan Lepas Pantai Terpancang HCML.....	1
Gambar 1.2 <i>Pedestal Crane</i> pada Anjungan Lepas Pantai Terpancang	3
Gambar 2.1 Model Sambungan <i>Crane Pedestal</i> dengan <i>Hull</i> FPSO	8
Gambar 2.2 <i>Meshing</i> pada <i>Crane Pedestal</i> dengan <i>Hull FPSO</i>	8
Gambar 2.3 <i>Stress</i> pada Sambungan <i>Crane Pedestal</i> dengan <i>Hull</i> FPSO	9
Gambar 2.4 Model Geometri <i>Tower Crane</i>	10
Gambar 2.5 <i>Meshing</i> pada Geometri <i>Tower</i>	10
Gambar 2.6 Distribusi <i>Fatigue Life</i>	11
Gambar 2.7 Beberapa Jenis Anjungan Berdasarkan Fungsinya ..	13
Gambar 2.8 Jenis-Jenis Bangunan Lepas Pantai	14
Gambar 2.9 Anjungan Lepas Pantai Terpancang (<i>Fixed Platform</i>)	15
Gambar 2.10 Jenis-Jenis <i>Pedestal-mounted Crane</i>	17
Gambar 2.11 Sketsa <i>Pedestal Crane</i> Anjungan Terpancang milik HCML	18
Gambar 2.12 Pergerakan <i>Jacket Leg</i> Akibat Gelombang.....	22
Gambar 2.13 Gerakan Gelombang <i>2-Dimensional</i> di Atas Permukaan Rata.....	23
Gambar 2.14 Beban Gelombang pada Struktur Silinder	24
Gambar 2.15 Arah Inklinasi <i>Crane Base</i> pada Anjungan Terpancang	27
Gambar 2.16 Tabel Percepatan Horizontal dan Sudut Inklinasi Berdasarkan Lokasi Penempatan <i>Crane</i>	27
Gambar 2.17 Orientasi Anjungan dan Delapan Arah Mata Angin	29
Gambar 2.18 <i>Free Body Diagram</i> Beban Operasional.....	31
Gambar 2.19 Momen Gaya pada Struktur.....	32
Gambar 2.20 Kegagalan Akibat Pembebanan Siklis.....	33
Gambar 2.21 Grafik Kurva S-N untuk <i>Tubular Joints</i>	34

Gambar 2.22 Tabel Kurva S-N Berdasarkan Jenis Tipe Sambungan	35
Gambar 2.23 Tegangan Siklis	36
Gambar 2.24 Diagram Batas Tegangan terhadap Kelelahan Logam.....	37
 Gambar 3.1 Pemodelan Anjungan Lepas Pantai Terpancang	47
Gambar 3.2 Letak <i>Pedestal Crane</i> pada Anjungan	48
Gambar 3.3 <i>Pedestal Crane</i> pada Dek Utama Anjungan	49
Gambar 3.4 Konfigurasi <i>Crane Pedestal</i>	50
Gambar 3.5 <i>Maximum Lateral Deflection</i>	54
Gambar 3.6 Elevasi Silinder <i>Crane Pedestal</i>	55
Gambar 3.7 Titik Berat <i>Crane Boom</i>	60
Gambar 3.8 Titik Berat Total <i>Crane Boom</i>	61
Gambar 3.9 <i>Input</i> Pembebanan Angin pada <i>Crane Tampak Samping</i>	62
Gambar 3.10 <i>Input</i> Pembebanan Angin pada <i>Crane Tampak Atas</i>	62
Gambar 3.11 <i>Free Body Diagram</i> Beban Operasional.....	65
Gambar 3.12 <i>Input</i> Pembebanan Operasional Tampak Samping	65
Gambar 3.13 Tampilan Jendela <i>Software Finite Element</i>	66
Gambar 3.14 Properti Material <i>Structural Steel</i>	67
Gambar 3.15 <i>Tabular Alternating Stress Mean Stress</i> Material <i>Structural Steel</i> untuk <i>Tubular Joints</i>	68
Gambar 3.16 Kurva S-N <i>Structural Steel</i> untuk <i>Tubular Joints to Flat Plate</i>	69
Gambar 3.17 Pemodelan Geometri <i>Crane Pedestal</i>	70
Gambar 3.18 Grafik Hasil Uji Konvergensi <i>Span Angle Coarse</i>	72
Gambar 3.19 <i>Meshing</i> Ukuran Elemen 50mm <i>Span Angle Coarse</i>	73
Gambar 3.20 Grafik Hasil Uji Konvergensi <i>Span Angle Medium</i>	74
Gambar 3.21 <i>Meshing</i> Ukuran Elemen 50mm <i>Span Angle Medium</i>	74

Gambar 3.22 Grafik Hasil Uji Konvergensi dengan Pengurutan Jumlah <i>Nodes</i>	75
Gambar 3.23 Kondisi Batas <i>Fixed Support</i> pada <i>Top Ring Pedestal Base</i>	76
Gambar 3.24 <i>Outline</i> Simulasi pada <i>Software Finite Element</i>	78
Gambar 3.25 <i>Free Body Diagram</i> dari <i>Pedestal Crane</i>	79
Gambar 3.26 Hasil Analisis Reaksi Gaya dengan <i>Software Finite Element</i>	80
Gambar 3.27 Hasil Analisis Reaksi Momen dengan <i>Software Finite Element</i>	81
Gambar 3.28 <i>Free Body Diagram</i> Silinder	82
Gambar 3.29 Nilai <i>K</i> pada Struktur dengan Perubahan Ukuran Luas Penampang.....	84
Gambar 3.30 Hasil Analisis dengan <i>Software Finite Element</i>	84
Gambar 3.31 Perbandingan Hasil Simulasi dan <i>Hand-Calculation</i>	85
Gambar 3.32 Jadwal Pelaksanaan Penelitian	85
 Gambar 4.1 Nilai <i>Equivalent (von-Mises) Stress</i> Pada Kecepatan Angin 17.3 m/s	88
Gambar 4.2 Tipe Pembebanan <i>Zero-Based</i>	89
Gambar 4.3 Nilai <i>Life Minimum</i> dan <i>Damage Maksimum</i> Pada Kecepatan Angin 8 m/s	90
Gambar 4.4 <i>Equivalent (von-Mises) Stress</i> Tanpa Beban	92
Gambar 4.5 <i>Equivalent (von-Mises) Stress</i> Beban Maksimum pada Radius 13.7m	92
Gambar 4.6 Tipe Pembebanan <i>Ratio</i> ($R=0.8297$)	94
Gambar 4.7 Nilai <i>Life Minimum</i> dan <i>Damage Maksimum</i> Pada Radius 13.7m.....	95
Gambar 4.8 Histogram Kontribusi Pembebanan terhadap Kelelahan Struktur <i>Crane Pedestal</i>	97
Gambar 4.9 Komparasi Mode Gerakan Bebas FPSO Belanak dengan Anjungan Terpancang.....	100
Gambar 4.10 Komparasi Struktur <i>Crane Pedestal</i> pada FPSO Belanak dengan Anjungan Terpancang.....	102

Gambar 4.11 Komparasi Titik Tinjau Kelelahan <i>Crane Pedestal</i> pada FPSO Belanak dengan Anjungan Terpancang.....	102
Gambar 4.12 Grafik Kecepatan Angin v.s <i>Maximum Equivalent (von-Mises) Stress</i>	103
Gambar 4.13 Grafik Kecepatan Angin Beserta Jumlah Kejadian Dalam 20 Tahun	103
Gambar 4.14 Grafik <i>Life</i> Minimum dan <i>Damage</i> Maksimum Berdasarkan Jumlah Siklus.....	104
Gambar 4.15 Grafik Radius v.s <i>Maximum Equivalent (von-Mises) Stress</i> dan Rasio.....	106
Gambar 4.16 Grafik <i>Life</i> Minimum dan <i>Damage</i> Maksimum Berdasarkan Rasio.....	107

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Defleksi Horizontal/Lateral	26
Tabel 2.2 Defleksi Vertikal	26
Tabel 2.3 <i>Shape Coefficients for Wind Force Calculations</i>	30
Tabel 2.4 <i>Wind Pressure Height Coefficient Above the Design Water Surface</i>	30
Tabel 3.1 Spesifikasi Anjungan Lepas Pantai Terpancang	47
Tabel 3.2 Spesifikasi <i>Pedestal Crane</i>	49
Tabel 3.3 Geometri dan Properti Material Silinder <i>Crane Pedestal</i>	50
Tabel 3.4 H_{max} dan T_{Hmax} Berdasarkan Return Period Gelombang	51
Tabel 3.5 Intensitas Kejadian Angin Selama 1 Tahun pada Elevasi 1m	51
Tabel 3.6 Spektrum Angkat <i>Crane</i>	52
Tabel 3.7 Intensitas Penggunaan <i>Crane</i>	53
Tabel 3.8 <i>Modal Analysis</i> Anjungan Terpancang	53
Tabel 3. 9 Defleksi <i>Leg B2</i> Akibat Beban Gelombang	54
Tabel 3.10 Konversi Kecepatan Angin pada Elevasi 10m	56
Tabel 3.11 Kecepatan Angin Elevasi Silinder	57
Tabel 3.12 Gaya Angin Tiap Elevasi	59
Tabel 3.13 Koordinat Titik Berat dan Luas Bagian <i>Crane Boom</i>	60
Tabel 3.14 Momen Gaya pada <i>Crane Pedestal</i> akibat Beban Terpusat pada <i>Crane Boom</i>	61
Tabel 3.15 Momen Gaya Angkat	65
Tabel 3.16 Properti Material untuk Desain	66
Tabel 3. 17 Tegangan yang Diperbolehkan Berdasarkan Jumlah Siklus	67
Tabel 3. 18 Hasil Uji Konvergensi <i>Span Angle Coarse</i>	71
Tabel 3.19 Hasil Uji Konvergensi <i>Span Angle Medium</i>	73
Tabel 3.20 Hasil Uji Konvergensi dengan Pengurutan Jumlah <i>Nodes</i>	75
Tabel 3.21 Metode <i>Meshing</i> Akhir	76
Tabel 3.22 Kondisi Pembebanan Operasional	77

Tabel 3.23 Kondisi Pembebanan Angin	77
Tabel 4.1 Hasil Simulasi Statis.....	88
Tabel 4.2 Hasil Simulasi Dinamis	91
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Statis.....	93
Tabel 4.4 Hasil Simulasi Dinamis	95
Tabel 4.5 Persentase Kontribusi Pembebanan terhadap Kelelahan Struktur <i>Crane Pedestal</i>	97
Tabel 4.6 Komparasi Data dan Analisis Pembebanan <i>Crane</i>	98
Tabel 4.7 Komparasi Hasil Analisis	99
Tabel 4.8 Komparasi Hasil Analisis Pembebanan Angin.....	105
Tabel 4.9 Komparasi Hasil Analisis Pembebanan Operasional	108

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Struktur lepas pantai telah banyak berkembang dengan tujuan pembangunan yang berbeda-beda. Tentu saja perkembangan eksplorasi dan produksi hidrokarbon menjadi tersebar luas dan pesat. Kebutuhan kesediaan *rig* pengeboran dan fasilitas produksi di lepas pantai, kebutuhan desain dan pembangunan struktur penyangga bangunan lepas pantai, serta segala masalah yang timbul dalam pembangunan anjungan dengan kondisi lingkungan yang ekstrim, telah menjadikan penelitian lepas pantai dan *engineering* menjadi salah satu cabang dalam perkembangan teknologi yang inovatif dan menarik untuk dipelajari.

Salah satu struktur lepas pantai yang sedang beroperasi di Indonesia adalah anjungan lepas pantai terpancang tipe *wellhead* di Selat Madura, yang dioperasikan oleh *Husky-CNOOC Madura Limited* (HCML). Anjungan ini memproduksi minyak mentah dengan menggunakan sumur sebagai tempat keluarnya minyak dan gas mentah, serta sumur injeksi untuk menginjeksikan air. Anjungan ini berlokasi lepas pantai di Selat Madura, Jawa Timur. Anjungan memiliki sumur dengan jumlah 6 yang akan dipasang pada kedalaman sekitar 316.4 kaki diukur dari *mean sea level*.



Gambar 1.1 Anjungan Lepas Pantai Terpancang HCML

Dalam pengoperasiannya, anjungan lepas pantai terpancang mendapatkan pengaruh beban yang signifikan dari lingkungan sekitarnya. Menurut Wirsching (1987), bangunan lepas pantai cenderung mengalami kelelahan karena beban lingkungan yang bekerja didominasi oleh gelombang yang bersifat siklik, sehingga kelelahan adalah penyebab utama kerusakan pada bangunan lepas pantai, dimana struktur merespon secara dinamis gelombang acak serta beban angin. Disamping itu faktor-faktor operasi lain pada tingkat tertentu juga dapat menambah beban siklis ini, sehingga keadaan struktur bertambah kritis (Djarmiko, 2003). Oleh sebab itu analisis kelelahan pada bangunan lepas pantai beserta komponen peralatan penunjang didalamnya sangat perlu untuk dilakukan.

Crane yang digunakan sebagai alat pemindah bahan merupakan salah satu fasilitas pada anjungan lepas pantai yang memiliki kemungkinan yang cukup besar untuk mengalami kelelahan pada strukturnya. Secara umum, sebuah *crane* mengalami dua jenis pembebanan, yaitu beban statis dan beban dinamis. Beban statis didapat dari berat *crane* itu sendiri, sedangkan beban dinamis mencakup beban operasional pada saat *crane* mengangkat bahan, serta beban angin yang bekerja langsung pada struktur *crane*, yang bersifat siklik. Beban yang menimbulkan terjadinya pergerakan pada dasar *crane* juga dapat menyebabkan *crane* mengalami kelelahan. Bagian *pedestal* pada *crane* adalah struktur yang paling rentan mengalami kelelahan.



Gambar 1.2 Pedestal Crane pada Anjungan Lepas Pantai Terpancang

Berdasarkan latar belakang di atas, pada tugas akhir ini dilakukan studi kelelahan *crane pedestal* akibat beban lingkungan dan operasional pada anjungan lepas pantai terpancang serta besar pengaruh masing-masing pembebanan tersebut terhadap umur kelelahan struktur.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Beban apa saja yang mempengaruhi anjungan lepas pantai terpancang dan struktur *crane* sehingga mengakibatkan kelelahan pada *crane pedestal*?
2. Berapa persentase pengaruh masing-masing beban tersebut terhadap umur kelelahan *crane pedestal*?
3. Berapa estimasi umur kelelahan dari struktur *crane pedestal*?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Analisis kelelahan dilakukan pada *crane* bagian *pedestal* anjungan terpancang, dengan Metode Elemen Hingga (MEH) dan hukum *Palmgren-Miner*.
2. Beban-beban yang ditinjau adalah beban gelombang, beban angin, dan beban operasional *crane*.

3. Tidak ada pertimbangan pengaruh beban akibat korosi, getaran, dan beban kecelakaan.
4. Pada pemodelan MEH, cara pengelasan *crane pedestal* dengan dek anjungan dianggap sempurna dan konstruksi *crane* diasumsikan masih baru tanpa ada cacat.
5. Pemodelan *crane pedestal* menggunakan *software solid modeling* serta analisis lokal menggunakan *software finite element* untuk mendapatkan respon dari struktur.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui beban apa saja yang mempengaruhi kelelahan struktur *crane pedestal* pada anjungan lepas pantai terpancang.
2. Mengetahui persentase pengaruh masing-masing beban tersebut terhadap umur kelelahan struktur *crane pedestal*.
3. Mengestimasi umur kelelahan dari struktur *crane pedestal*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Identifikasi terhadap beban-beban siklis beserta persentase pengaruh masing-masing pembebanan yang dapat mengakibatkan struktur *crane pedestal* mengalami kelelahan.
2. Mengetahui titik kritis yang menjadi pemicu kerusakan struktur *crane pedestal*.
3. Hasil perhitungan menjadi referensi dalam perancangan *crane pedestal* serta analisis kegagalan akibat beban-beban yang berpengaruh sebagai penelitian lanjutan.
4. Sebagai acuan standar teknis operasional, kesehatan, dan keselamatan kerja bagi seluruh pekerja, khususnya operator *crane*.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pendahuluan

Pada bab pendahuluan diterangkan mengenai hal yang melatarbelakangi tugas akhir, perumusan masalah yang perlu diselesaikan, tujuan untuk menjawab permasalahan yang diangkat, manfaat dilakukannya penelitian dalam tugas akhir, ruang lingkup pembatas analisis, serta sistematika penulisan laporan yang digunakan dalam tugas akhir.

2. Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Bab tinjauan pustaka berisi penelitian, buku, dan jurnal yang digunakan penulis sebagai pedoman dalam penelitian tugas akhir ini. Dasar teori serta rumus yang digunakan dalam penelitian tugas akhir dicantumkan dalam bab ini.

3. Metodologi Penelitian

Pada bab metodologi penelitian dijelaskan tentang metode pengerjaan dalam tugas akhir yang akan dilakukan beserta prosedur yang digunakan.

4. Analisis Data dan Pembahasan

Pada bab ini dijelaskan mengenai analisis hasil simulasi, perhitungan, serta pembahasan hasil simulasi.

5. Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisikan kesimpulan dari hasil pengolahan data simulasi yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

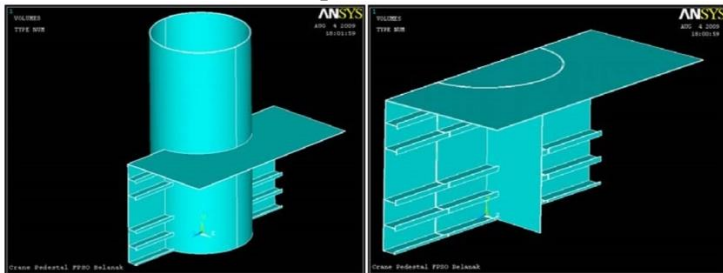
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

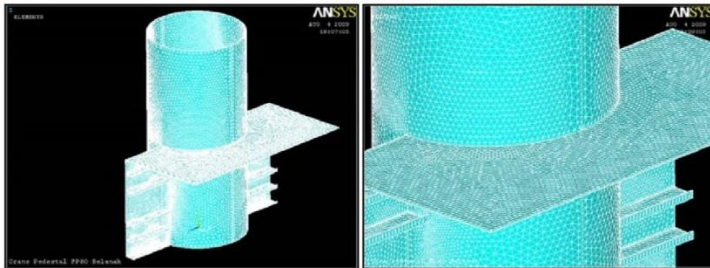
Pada 2010, Dhani Trie Prasetyo melakukan penelitian mengenai kelelahan (*fatigue*) dari struktur *scantling crane pedestal* pada sebuah FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*). FPSO dalam operasinya mendapatkan pengaruh signifikan dari beban lingkungan dan operasional, sehingga pergerakan dari FPSO akibat gelombang laut dapat mempengaruhi komponen-komponen struktur yang ada di atasnya, termasuk struktur *crane pedestal*. Konstruksi *crane pedestal* beserta *scantling*nya yang tersambung menerus ke lambung FPSO harus kuat menahan beban siklis yang terjadi. Pada penelitiannya yang berjudul “Keandalan *Crane Pedestal’s Scantling* FPSO Belanak Terhadap Beban Kelelahan”, kelelahan dikaji dengan metode deterministik-spektral. Penyelesaian dengan metode ini dilakukan dengan mengaplikasikan persamaan kegagalan kumulatif berdasarkan hukum *Palmgren-Miner*. Analisis dimulai dengan penentuan beban dinamis lingkungan menggunakan *software MOSES*, serta penentuan tegangan lokal pada semua tingkat beban siklis menggunakan *software ANSYS*. Beban siklus dari gelombang, angin, dan operasional diakumulasi dari beban terendah sampai dengan tertinggi. Hasil analisis menunjukkan kontribusi beban terhadap umur kelelahan *crane pedestal scantling* FPSO Belanak adalah disebabkan oleh beban gelombang sebesar 97.84%, beban operasional sebesar 2.16%, dan beban angin sebesar 0.000000269%. Umur kelelahan dari *crane pedestal scantling* FPSO Belanak adalah 109.309 tahun atau 3.64 kali umur operasinya.

Penelitian terkait mengenai analisis umur kelelahan juga dilakukan oleh Muammar Kadhafi pada 2011 dengan judul penelitian “Studi Kelelahan *Crane Pedestal* FPSO Belanak Akibat Respon Dinamik Gerakan Beban Angkat pada *Crane*”. Pada penelitian ini diperhitungkan aspek gerakan beban yang

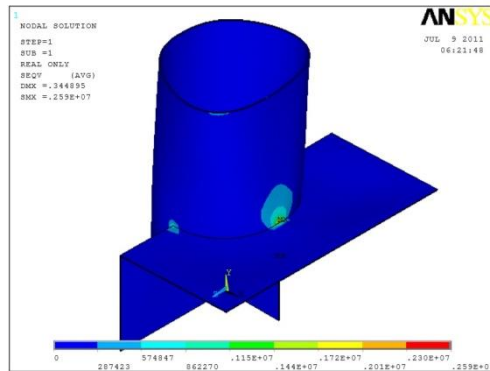
diangkat oleh *crane* beserta besar kontribusi gerakan tersebut terhadap umur kelelahan *crane pedestal*. Gerakan beban angkat pada penelitian ini meliputi dua derajat kebebasan yaitu gerakan *rolling* dan *pitching* dari FPSO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pergerakan beban yang diangkat *crane* memiliki pengaruh sebesar 0.005% terhadap umur kelelahan *crane pedestal*. Pada penelitian ini digunakan hukum *Palmgren-Miner*. Umur kelelahan dari struktur *crane pedestal* FPSO Belanak dengan penambahan aspek gerakan beban pada *crane* adalah 148 tahun atau mendekati 5 kali umur operasi FPSO.



Gambar 2.1 Model Sambungan *Crane Pedestal* dengan *Hull* FPSO
(Kadhafi, 2010)



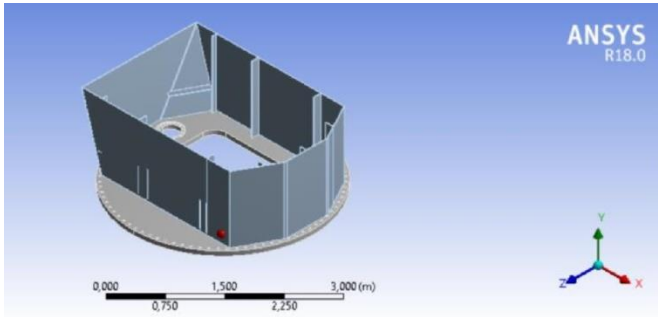
Gambar 2.2 Meshing pada *Crane Pedestal* dengan *Hull* FPSO
(Kadhafi, 2010)



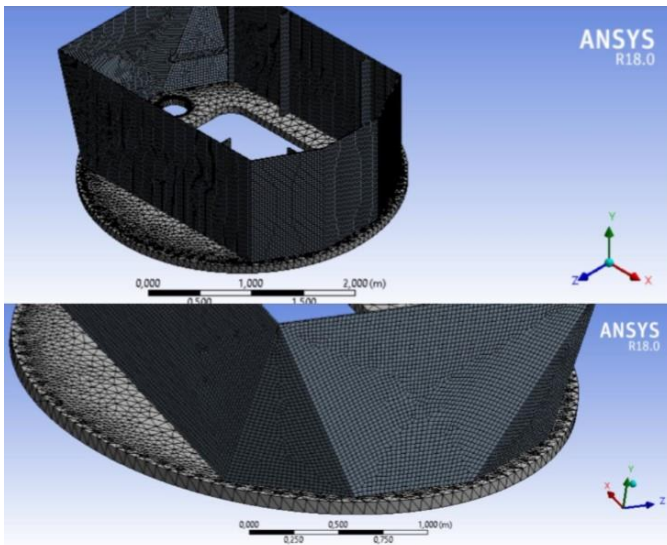
Gambar 2.3 Stress pada Sambungan Crane Pedestal dengan Hull FPSO

(Kadhafi, 2010)

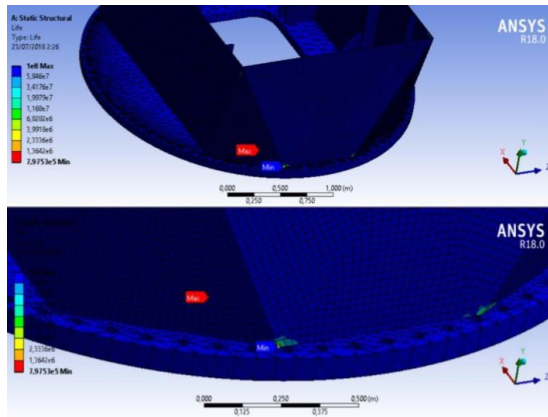
Selanjutnya, Hanun Cahyono pada 2018 melakukan penelitian mengenai analisis umur kelelahan dengan judul “Analisis *Fatigue* Pada *Slewing Tower Level Luffing Crane* Berbasis Metode Elemen Hingga”. Analisis dilakukan dengan pembebanan vertikal dan horizontal pada bagian *tower* menggunakan simulasi *software ANSYS*. Dilakukan simulasi *static strucural* pada bagian *tower* dengan kondisi batas *fixed support* pada bagian dasar. Sebagai tahap validasi, analisis kelelahan hasil simulasi dibandingkan dengan perhitungan tangan menggunakan hukum *Palmgren-Miner* untuk memperoleh umur kelelahan. Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa pada pembebanan secara vertikal dan horizontal, umur kelelahan dari *Slewing Tower Level Luffing Crane* ini jauh melebihi *service life* saat munculnya keretakan yaitu 3 tahun. Hasil menjadi bukti bahwa kegagalan berupa *crack* yang terjadi bukan disebabkan oleh kelelahan.



Gambar 2.4 Model Geometri *Tower Crane*
(Cahyono, 2018)



Gambar 2.5 *Meshing* pada Geometri *Tower*
(Cahyono, 2018)



Gambar 2.6 Distribusi Fatigue Life
(Cahyono, 2018)

2.2 Dasar Teori

Dalam dasar teori ini akan dijelaskan tinjauan pustaka yang akan menjadi acuan dari tugas akhir ini. Semua teori, persamaan, dan *codes* yang akan digunakan dalam mengerjakan tugas akhir diuraikan dalam bab ini.

2.2.1 Anjungan Lepas Pantai

Anjungan lepas pantai adalah salah satu bangunan lepas pantai dengan fasilitas penunjang proses pengeboran sumur dalam melakukan eksplorasi, ekstraksi, penyimpanan, dan pemrosesan, baik gas alami maupun minyak bumi, dalam bentuk bebatuan di bawah *seabed*. Pengeboran lepas pantai pertama kali dilakukan pada tahun 1930 di sebuah teluk di Meksiko. Anjungan produksi lepas pantai dengan desain modern mulai dipakai pada tahun 1950, membuat industri lepas pantai mengalami perkembangan pesat pada 1970. Pada tahun 1990 perkembangan eksplorasi hidrokarbon lebih dititikberatkan pada perkembangan lapangan-lapangan kecil yang menghasilkan keuntungan ekonomi rendah. Eksplorasi hidrokarbon kemudian difokuskan pada perairan yang sangat dalam, yang memicu perkembangan teknologi inovatif

dengan tujuan membangun anjungan produksi yang dapat mencapai kedalaman laut yang terus bertambah.

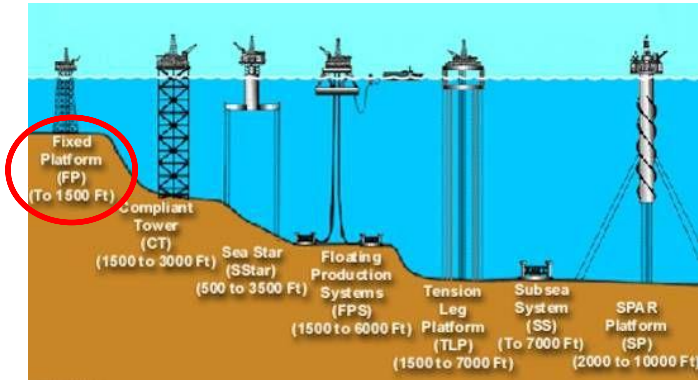
Mengutip dari buku *Encyclopaedia of Hydrocarbons Volume 1 / Exploration, Production and Transport* (2005), fungsi utama anjungan lepas pantai adalah untuk membantu proses pengeboran hidrokarbon di dasar laut, dengan pengerjaan minimum dan perlindungan lingkungan serta keamanan kerja yang maksimum. Hasil pengeboran ini akan disalurkan ke fasilitas produksi di daratan untuk proses pengolahan yang lebih spesifik sebelum proses komersialisasi. Dikarenakan biaya konstruksi lepas pantai tinggi, maka fasilitas perairan terbuka harus dibangun sesederhana mungkin.

Berdasarkan fungsinya, anjungan lepas pantai dibagi menjadi beberapa jenis, seperti *separation*, *gas processing*, *living quarter*, *manifold*, dan *wellhead platform* (Logiani, 2015). Perbedaan mendasar dari kelima jenis anjungan tersebut adalah fasilitas yang tersedia dalam menangani minyak mentah (*crude oil*) yaitu ekstraksi, proses, dan ekspor. Sebagai contoh, anjungan jenis *wellhead* dengan fungsi utama sebagai anjungan produksi minyak mentah memiliki fasilitas sumur minyak dan gas sebagai tempat keluarnya minyak mentah serta sumur injeksi untuk menginjeksikan air, sedangkan anjungan jenis *manifold* digunakan sebagai pengumpul semua minyak mentah yang dihasilkan beberapa anjungan *wellhead* jika dalam suatu lapangan migas terdapat banyak anjungan *wellhead*. Anjungan *separation* dapat memisahkan fase minyak, air, dan gas dari minyak mentah yang dihasilkan. Pada anjungan *gas processing* terdapat fasilitas untuk *treatment* gas yang dihasilkan yaitu dengan menaikkan tekanan gas pada nilai yang diinginkan, yang selanjutnya dapat digunakan sebagai *lift* gas yang diinjeksikan kembali ke sumur migas, diekspor keluar dari anjungan, atau digunakan untuk keperluan bahan bakar pada anjungan itu sendiri. Sedangkan untuk anjungan *living quarter* digunakan untuk akomodasi pekerja.



Gambar 2.7 Beberapa Jenis Anjungan Berdasarkan Fungsinya
(Risanto, 2016)

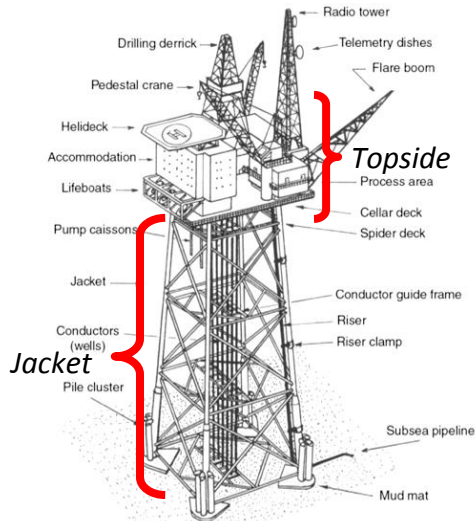
Seiring dengan berkembangnya teknologi, perusahaan minyak dan gas dapat memilih berbagai macam metode pengeboran dengan pilihan tipe struktur anjungan yang berbeda-beda, sehingga pengeboran dapat dilakukan di lokasi manapun dengan kedalaman berapapun. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi pemilihan tipe struktur anjungan adalah kedalaman perairan dimana anjungan tersebut akan diinstalasi. Contohnya, untuk perairan dengan kedalaman 3,000 kaki, anjungan lepas pantai yang dapat dipilih adalah *compliant tower*, dikarenakan kemampuan anjungan tersebut untuk berdiri stabil. Sedangkan untuk perairan dengan kedalaman mencapai 6,000 kaki, anjungan yang dipilih harus dapat berosilasi pada saat dikenai beban lingkungan seperti beban gelombang, arus, dan angin yang ekstrim, sehingga jenis bangunan yang cocok adalah *Floating Production System* (*Encyclopaedia of Hydrocarbons*, 2005). Pada perairan dangkal dengan kedalaman tidak lebih dari 300-400 meter atau 1,500 kaki, anjungan yang digunakan yaitu berupa struktur terpancang (*fixed*) yang berdiri di atas dasar laut.



Gambar 2.8 Jenis-Jenis Bangunan Lepas Pantai

(www.semanticscholar.org)

Anjungan lepas pantai terpancang di perairan dangkal terdiri dari satu bangunan produksi *topside* dan struktur penyangga *topside* (*jacket*) yang tertambat pada *seabed*. *Topside* memiliki beberapa fasilitas, diantaranya: *rig* pengeboran, sumur dan kepala sumur, peralatan penunjang proses pengolahan hidrokarbon, fasilitas penunjang dan keamanan, serta akomodasi untuk pekerja. Sedangkan fungsi dari *jacket* yaitu menjaga *topside* agar berada cukup jauh dari permukaan air laut sehingga mencegah bangunan tersebut terbentur oleh ombak.



Gambar 2.9 Anjungan Lepas Pantai Terpancang (*Fixed Platform*)
(www.drillingformulas.com)

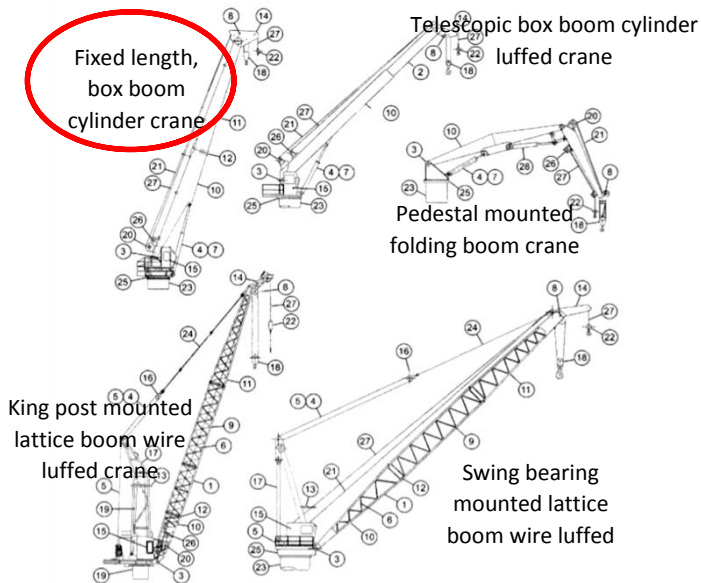
Umumnya, anjungan terpancang dapat terhubung ke darat, dimana hidrokarbon hasil pengeboran dikumpulkan, melalui saluran pipa bawah laut (*subsea pipeline*). Hidrokarbon yang diambil dari sumur mengalir melewati berbagai peralatan pengolah hidrokarbon di anjungan, dan kemudian disalurkan melalui pipa bawah laut (*subsea pipeline*) menuju tempat pengumpulan hasil produksi di daratan. Di daratan inilah kemudian hidrokarbon tersebut diolah menjadi gas yang dapat dikonsumsi. Hal ini menyebabkan anjungan tidak membutuhkan fasilitas penyimpanan hidrokarbon.

Pada tugas akhir ini akan dibahas mengenai anjungan lepas pantai terpancang dengan jenis anjungan *wellhead*, yaitu anjungan dengan fungsi utama sebagai produksi minyak mentah dengan struktur penyangga tertambat pada *seabed*.

2.2.2 Offshore Pedestal-mounted Crane

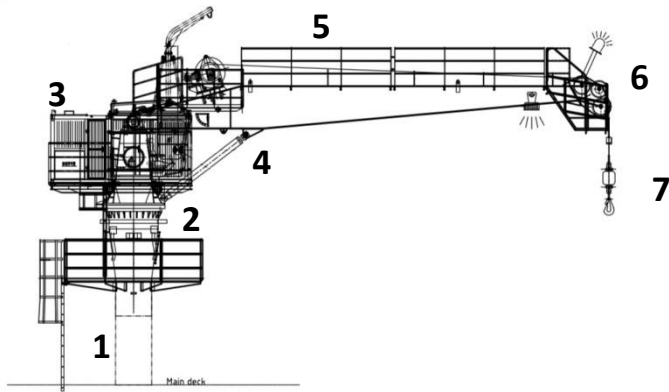
Crane merupakan salah satu fasilitas di anjungan yang digunakan untuk memindah bahan atau manusia ke atau dari kapal laut, kapal tongkang, dan struktur, dengan gerakan rotasi dan translasi. Jenis *crane* yang umum dipakai pada bangunan lepas pantai adalah *pedestal-mounted*, yaitu *crane* yang tertambat pada suatu tumpuan tetap dan tidak dapat dipindah-pindah. *Crane* pada anjungan lepas pantai banyak digunakan untuk membantu proses pengeboran dan operasi produksi lainnya. Berbeda dengan *crane* di darat atau *onshore*, *crane* yang digunakan pada anjungan lepas pantai merupakan struktur tetap yang tidak dapat bergerak bersama dengan beban yang diangkut.

Pemilihan jenis *pedestal crane* yang dipakai pada suatu anjungan tergantung dari beberapa faktor pertimbangan, seperti kapasitas beban angkut, lokasi pemasangan *crane*, kondisi lingkungan di sekitar anjungan, lokasi beban terhadap *crane*, dan sebagainya. Terdapat beberapa jenis *crane* yang umum digunakan di anjungan lepas pantai, diantaranya *fixed length box boom cylinder crane*, *telescopic box boom cylinder luffed crane*, *pedestal mounted folding boom crane*, *king post mounted lattice boom wire luffed crane*, dan *swing bearing mounted lattice boom wire luffed crane* (API 2C, 2012). Masing-masing dari jenis *crane* tersebut memiliki kelebihan dan fitur yang berbeda-beda, tergantung dari kebutuhan anjungan. Contohnya, *crane* teleskopis memiliki *boom* yang dapat diatur panjangnya, sedangkan *folding boom crane* memiliki *boom* yang dapat ditekuk.



Gambar 2.10 Jenis-Jenis Pedestal-mounted Crane
(API 2C, 2012)

Pada anjungan terpancang milik HCML digunakan *Fixed Length Box Boom Cylinder Crane* sebagai penunjang fasilitas produksi. Crane ini memiliki panjang *boom* yang tetap dan *solid* tanpa kisi, bekerja dengan menggunakan sistem hidrolik, serta menggunakan silinder hidrolik untuk mengatur sudut elevasi dari *boom*. Bagian-bagian crane dapat dilihat pada Gambar 2.11 berikut.



Gambar 2.11 Sketsa Pedestal Crane Anjungan Terpancang milik HCML
(Sumber: Dokumen HCML)

Beberapa bagian utama dari *pedestal crane* terdiri dari:

1. *Pedestal* atau *base*
Sebuah substruktur penyangga dimana *crane* tersebut tertambat. *Pedestal* menghubungkan *crane* dengan dek anjungan.
2. *Swing-circle assembly*
Komponen penghubung antara struktur atas *crane* yang berputar dengan *pedestal*.
3. *Cab*
Tempat operator *crane* mengendalikan pengoperasian mesin *crane*.
4. *Boom luffing cylinder*
Silinder penyangga *boom* dan pengatur sudut elevasi *boom*. Silinder ini disebut *boom hoist mechanism*, yaitu mekanisme yang digunakan dalam menaikkan dan menurunkan *boom*. Silinder bekerja dengan sistem hidrolik.
5. *Boom*
Bagian *crane* yang tertambat pada struktur utama dan sebagai penyangga *hoist*.

6. *Main hoist drum*

Hoist adalah bagian dari *crane* berupa tali atau rantai yang digunakan untuk mengangkat atau menurunkan suatu beban dengan cara memperpanjang atau memperpendek *hoist* melalui *hoist drum*.

7. *Hook block*

Pengait pada ujung *hoist* untuk mengaitkan beban yang akan diangkat.

Kelebihan dari *crane* yang digunakan pada anjungan ini yaitu kegunaan yang luas, desain kokoh, *boom* yang dapat menangani beban kejut, perawatan yang mudah dan murah, serta umur operasi yang panjang. Sedangkan kekurangan dari *crane* ini yaitu jari-jari kerja yang kecil, sehingga *crane* tidak dapat menjangkau benda yang terletak jauh dari tempat *crane* tersebut terinstalasi.

2.2.3 Pembebanan

Kriteria yang terpenting dalam perancangan konstruksi bangunan lepas pantai adalah kemampuan untuk dapat menahan beban-beban yang mungkin dialami oleh struktur itu sendiri. Menurut Yunizar Mahardika (2015), keandalan suatu struktur anjungan lepas pantai ditentukan oleh kondisi luar, beban-beban yang bekerja, serta konfigurasi dan kualitas material struktur. Sebuah struktur anjungan lepas pantai didesain untuk dapat menahan beban yang dapat dikategorikan sebagai berikut:

1. Beban permanen atau beban mati.
2. Beban operasional atau beban hidup.
3. Beban lingkungan.
4. Beban konstruksi dan instalasi.
5. Beban kecelakaan.

Setiap peralatan pada anjungan juga mengalami pembebanan, termasuk pada *crane*. Menurut Ryandi Permana Putra (2015), beban ditinjau dari sifatnya dan pengaruhnya terhadap konstruksi yang menyangga dibedakan menjadi dua yaitu:

1. Beban Statis

Beban statis adalah beban yang berubah apabila berat total *crane* berubah, sebagai akibat kegiatan bongkar muat dimana beban kerja adalah yang menyebabkan fluktuasi. Pembebanan statis merupakan jenis pembebanan yang bersifat tetap (Mulyanto, 2011).

2. Beban Dinamis

Beban dinamis adalah beban yang besarnya berubah terhadap waktu dengan frekuensi tertentu yang menimbulkan tegangan dinamis. Beban dinamis terjadi berulang-ulang dalam sebuah *cycle* atau bersifat siklis. Contoh beban dinamis pada sebuah *crane* adalah beban ketika *crane* bergerak, baik secara vertikal maupun horizontal (CISC, 2009).

Berbeda dengan desain bangunan di darat atau *onshore* yang pada umumnya dipengaruhi oleh beban permanen dan operasional, struktur lepas pantai lebih banyak dipengaruhi oleh beban lingkungan, seperti beban angin, gelombang laut, arus, gempa bumi, dan sebagainya. Pada tugas akhir ini, beban yang dianalisis difokuskan pada beban gelombang, beban angin, dan beban operasional.

2.2.4 Beban Gelombang

Gelombang laut merupakan salah satu fenomena alam di laut yang keberadaannya sangat bervariasi dan kompleks. Gelombang dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam tergantung pada gaya pembangkitnya. Menurut Asyer Arung (2016), pembangkit gelombang dapat disebabkan oleh angin (gelombang angin), gaya tarik menarik bumi-bulan-matahari (gelombang pasang surut), gempa (vulkanik ataupun tektonik) di dasar laut (gelombang tsunami), jatuhnya benda-benda langit, serta gelombang akibat pergerakan kapal.

Gelombang laut merupakan sumber beban yang memiliki pengaruh paling besar pada anjungan lepas pantai. Gelombang datang dalam bentuk yang berbeda-beda, bermacam ketinggian

dan panjang gelombang, dan bergerak mendekati suatu anjungan dari satu atau banyak arah secara simultan. Akibatnya, intensitas dan distribusi dari gaya yang diakibatkan oleh gelombang sangat sulit untuk ditentukan.

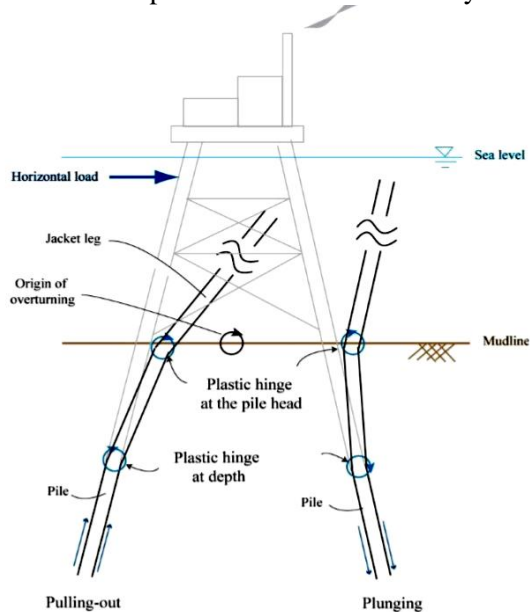
Struktur lepas pantai didesain untuk dapat bertahan pada kondisi dengan kombinasi pembebanan dari angin, gelombang, dan arus laut yang berupa beban ekstrim, dengan memperhitungkan probabilitas kejadian masing-masing beban (baik besar (*magnitude*) maupun arah datangnya). Untuk anjungan dengan tipe *jacket*, *compliant tower*, *gravity-based structure*, dan *caisson*, pembebanan dinamis akibat fluida didominasi oleh gelombang, sedangkan arus dan angin memiliki peranan sekunder.

Anjungan lepas pantai terpancang dapat didefinisikan sebagai anjungan yang menjulang di atas permukaan air laut dan tertambat pada *seabed* menggunakan *piling*, tumpuan, tiang pancang, atau struktur lainnya dengan tujuan untuk menjaga agar bangunan di atasnya tetap dalam kondisi seimbang atau stasioner dalam jangka waktu tertentu. Pada umumnya anjungan dirancang menggunakan prosedur desain dan kriteria yang direkomendasikan oleh *American Petroleum Institute* (API) dalam “*API RP-2A – Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*”, dimana secara implisit karakteristik dasar, pendekatan perancangan, beserta hasilnya memenuhi kaidah-kaidah utama struktur lepas pantai terpancang.

Pembebanan gelombang bekerja secara langsung pada struktur *jacket*. *Jacket* pada anjungan lepas pantai terpancang terdiri dari (API RP-2A, 2000):

1. *Frame jacket* dengan *welded brace*, berbentuk silinder, berdiri dengan ketinggian tertentu dari *seabed* ke atas permukaan laut, didesain sebagai elemen struktural utama dari anjungan, serta mengakibatkan beban horizontal atau lateral dan beban vertikal pada pondasinya.

2. *Pile* atau tiang pancang yang menancap permanen pada dasar laut, yang juga mengakibatkan beban lateral dan vertikal.
3. *Superstructure* atau ruang untuk dek (*topside*) untuk menahan beban operasional dan beban lainnya.



Gambar 2.12 Pergerakan Jacket Leg Akibat Gelombang
(Ishwarya, 2016)

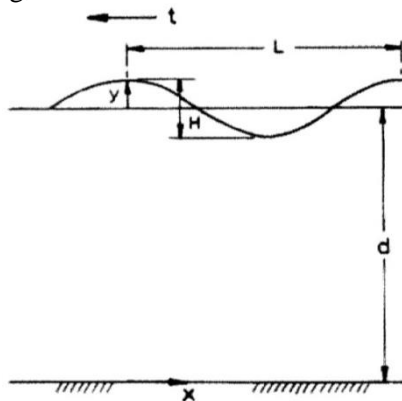
2.2.4.1 Karakteristik Gelombang

Gelombang dapat dijelaskan sebagai permukaan air yang merupakan bukit-bukti dan lembah-lembah diantaranya, yang menjalar berurutan sambung-menyambung dari suatu bagian ke bagian lainnya. Gelombang yang terjadi pada batas antara dua media yang berlainan, misalnya pada batas air dan udara, disebut dengan gelombang permukaan (*surface wave*), sedangkan gelombang yang terjadi pada batas antara dua media yang

berlainan densitasnya disebut gelombang bawah permukaan (Arung, 2016).

Terdapat tiga parameter utama yang dibutuhkan dalam menentukan karakteristik gelombang, yaitu:

1. Periode (T), yaitu waktu yang dibutuhkan untuk dua puncak gelombang melewati satu titik tertentu,
2. Tinggi (H), yaitu jarak vertikal antara puncak dan palung. Untuk gelombang linier, amplitudo dari puncak sama dengan amplitudo palung, sedangkan tidak sama untuk gelombang non-linier, dan
3. Kedalaman (d), yaitu jarak vertikal dari *mean water level* ke *mean ocean floor*. Untuk perhitungan dengan teori gelombang, dasar laut diasumsikan horizontal dan datar.

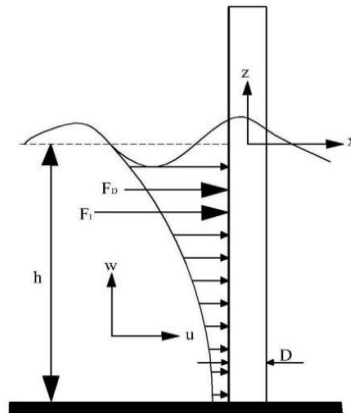


Gambar 2.13 Gerakan Gelombang 2-Dimensional di Atas Permukaan Rata
(Chakrabarti, 2005)

Sedangkan untuk mengetahui besar gaya yang terjadi pada struktur silinder akibat beban gelombang digunakan *Morison Equation*, yaitu persamaan untuk menghitung total kekuatan gelombang yang merupakan penjumlahan dari gaya *drag* dan inersia (Morison et al., 1950). Teori ini digunakan karena ukuran struktur jauh lebih kecil dari panjang gelombang. Parameter yang diperhitungkan pada teori ini yaitu:

1. Diameter silinder efektif struktur

2. Volume silinder per unit panjang
3. Luas proyeksi struktur per unit panjang
4. Kecepatan partikel air



Gambar 2.14 Beban Gelombang pada Struktur Silinder
(*American Journal of Engineering Research*, 2014)

2.2.4.1 Analisis Beban Gelombang

Beban gelombang yang bekerja pada struktur *leg* dapat dianalisis dengan melakukan pengumpulan data dan pemodelan. Pemodelan terdiri dari pemodelan struktur (elemen yang mendukung kekuatan bangunan lepas pantai seperti *leg* dan *bracing*) dan pemodelan beban (pembebanan yang mempengaruhi kekuatan dari bangunan struktur lepas pantai seperti *self-weight*, beban hidup, dan beban lingkungan).

Menurut Wistie Annelya (2008), analisis perilaku bangunan lepas pantai dalam menerima pengaruh dari beban yang terjadi terdiri dari:

1. Analisis *in-place*, yaitu analisis pada *serviceability* bangunan lepas pantai dalam menerima beban yang bekerja. Analisis dilakukan dengan mensimulasikan perilaku dari struktur tersebut sedekat mungkin dengan kondisi aktualnya untuk mengetahui respon struktur selama masa operasi, dalam kondisi operasi maupun kondisi ekstrim. Parameter

yang dilihat dalam mengevaluasi *serviceability* struktur antara lain tegangan pada elemen, sambungan (*joint*), dan tiang pancang.

2. Analisis dinamik, yaitu analisis untuk mendapatkan periode alami struktur akibat adanya beban yang bekerja pada struktur. Pada tugas akhir ini, beban yang dimaksud adalah beban gelombang. Dengan diperolehnya periode natural dari struktur, dapat diperoleh besarnya DAF (*Dynamic Amplification Factor*), dimana tujuan dari metode DAF adalah memperbesar respon statis dengan menggunakan suatu konstanta tertentu untuk mendapatkan respon dinamis yang ekuivalen. DAF menunjukkan pengaruh osilasi struktur terhadap efek pembesaran gelombang.

DAF pada struktur anjungan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{T_p}{T_z}\right)^2\right\}^2 + \left(2\beta \frac{T_p}{T_z}\right)^2}} \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan:

T_p = Periode natural anjungan (s)

T_z = Periode gelombang (s)

β = Persentase *critical damping* (2%)

Pada *software* analisis struktur bangunan lepas pantai, beban gelombang yang didapat sudah memperhitungkan nilai DAF.

2.2.4.2 Defleksi Akibat Gelombang

Pada pengoperasiannya, anjungan mendapat beban dari gelombang laut, arus, angin, dan operasi, sehingga untuk menjamin integritas struktur dan *serviceability* anjungan, beberapa kriteria desain yang harus terpenuhi antara lain adalah defleksi (simpangan) lokal dan global ke arah horizontal maupun vertikal seperti ditampilkan pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

Defleksi adalah lendutan atau lenturan yang terjadi pada *jacket leg* sebagai akibat dari bekerjanya gaya transversal, yaitu

vektor gaya tegak lurus dengan sumbu *leg*. Gaya ini akan menimbulkan momen, dan besar kecilnya defleksi dipengaruhi oleh besar kecilnya momen tersebut. Defleksi juga dipengaruhi oleh bahan atau material serta bentuk atau dimensi penampangannya.

Untuk relevansi terhadap tugas akhir ini, kriteria yang perlu diperhatikan adalah defleksi global anjungan ke arah horizontal pada *leg* yang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.1 Defleksi Horizontal/Lateral

(Sumber: Dokumen HCML)

Komponen	Batas Defleksi
<i>Legs/columns</i>	Defleksi maksimum horizontal/lateral dari <i>mudline</i> hingga puncak struktur anjungan adalah <i>sway</i> maksimum dengan ketinggian $H/200$.

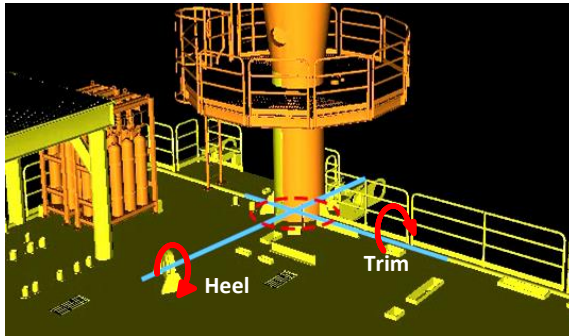
Tabel 2.2 Defleksi Vertikal

(Sumber: Dokumen HCML)

Komponen	Batas Defleksi
<i>Crane Pedestal</i>	Sudut kemiringan maksimum tidak lebih dari 0.5° .

2.2.4.3 Inklinasi *Crane Base*

Pada saat *crane* ditempatkan pada struktur bergerak, *crane* dapat mengalami inklinasi. Inklinasi adalah terbentuknya sudut kemiringan *crane* terhadap bidang datar. Pergerakan struktur dimana *crane* tersebut tertambat menyebabkan *crane base* mengalami dua mode gerakan rotasional, yaitu *heel* dan *trim*.



Gambar 2.15 Arah Inklinasi Crane Base pada Anjungan Terpancang

Sedangkan menurut *API*, nilai dari percepatan horizontal akibat inklinasi *crane* berbeda-beda tergantung dari penempatan *crane* tersebut. Percepatan horizontal *crane* dapat dilihat pada tabel sebagai berikut:

Crane Mounted on:	Crane Static Inclination Angle, deg.		Crane Dynamic Horizontal Acceleration, g's
	Heel	Trim	
Fixed Platform	0.5	0.5	0.0
Tension Leg Platform (TLP)	0.5	0.5	$0.007 \times H_{sig} \geq 0.03$
Spar	0.5	0.5	$0.007 \times H_{sig} \geq 0.03$
Semisubmersible	1.5	1.5	$0.007 \times H_{sig} \geq 0.03$
Drillship	2.5	1	$0.01 \times (H_{sig})^{1.1} \geq 0.03$
Floating Production Storage Offloader (FPSO)	2.5	1	$0.01 \times (H_{sig})^{1.1} \geq 0.03$

Gambar 2.16 Tabel Percepatan Horizontal dan Sudut Inklinasi Berdasarkan Lokasi Penempatan Crane

(*API-2C*, 2004)

dengan nilai $1 \text{ g} = 32.2 \text{ ft/s}^2$.

Pada lokasi penempatan *crane* seperti *drillship* dan FPSO, pergerakan dasar struktur terjadi bersamaan dengan pergerakan kapal yang diakibatkan oleh gerakan gelombang laut. Berbeda dengan kapal, inklinasi *crane* pada anjungan terpancang terjadi akibat adanya kemungkinan pergerakan anjungan yang diakibatkan oleh beban gelombang, serta arus dan angin, yang bekerja langsung pada struktur anjungan. Walaupun demikian seperti yang dijelaskan di bagian sebelumnya bahwa struktur

anjungan lepas pantai dirancang untuk memenuhi kriteria-kriteria tertentu antara lain *serviceability* sehingga pergerakan (*motion*) anjungan yang terjadi akibat beban lingkungan menjadi kecil.

2.2.5 Beban Angin

Beban angin bekerja pada struktur anjungan lepas pantai yang berada di atas air laut, termasuk semua peralatan yang berada di dalamnya. Salah satu parameter penting yang berkaitan dengan data angin adalah interval waktu dengan kecepatan angin yang dirata-rata. Untuk interval waktu kurang dari satu menit, kecepatan angin diklasifikasikan sebagai tiupan (*gusts*). Untuk interval waktu satu menit atau lebih, kecepatan angin diklasifikasikan sebagai kecepatan angin berkelanjutan (*sustained*).

Untuk menghitung kecepatan angin pada suatu titik elevasi tertentu dari permukaan air, digunakan hukum *one-seventh power* (Dawson, 1983). Hukum ini dapat digunakan untuk elevasi di atas 30ft hingga 600ft. Sebagai contoh, untuk menghitung kecepatan angin pada elevasi di atas 10m maka persamaan dapat ditulis sebagai berikut:

$$V = V_0 \left(\frac{y}{10} \right)^{1/7} \dots\dots\dots (2.2)$$

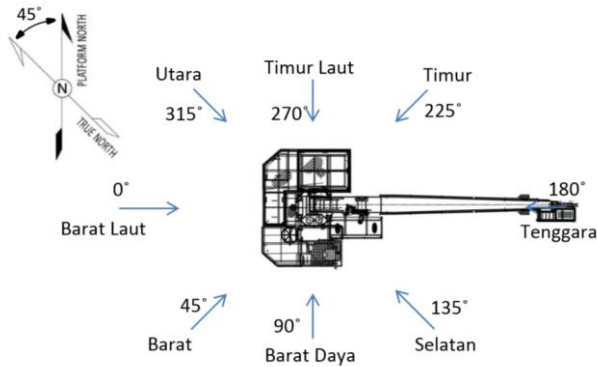
dengan:

V = Kecepatan angin pada elevasi y (m/s)

V_0 = Kecepatan angin pada elevasi 10m (m/s)

y = Elevasi yang akan dihitung kecepatan anginnya (m)

Pada tugas akhir ini, intensitas angin yang mengenai struktur dihitung berdasarkan arah datangnya, yaitu utara, timur laut, timur, tenggara, selatan, barat daya, barat, dan barat laut. Anjungan terpancang milik HCML memiliki orientasi arah utara dengan perbedaan 45° dari arah utara yang sesungguhnya. Arah orientasi dan mata angin pada anjungan dan *pedestal crane* dijelaskan dalam bentuk gambar sebagai berikut:



Gambar 2. 17 Orientasi Anjungan dan Delapan Arah Mata Angin
(Sumber: Dokumen HCML)

Untuk menghitung gaya angin yang mengenai strukur digunakan persamaan (ABS, 2001):

$$F = \frac{1}{2} \rho C_s C_h A V^2 \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan:

- F = Gaya angin (N)
- ρ = Massa jenis udara ($1,226 \text{ kg/m}^3$)
- C_s = Koefisien dari bentuk benda yang terkena angin
- C_h = Koefisien dari ketinggian benda
- A = Area/luasan yang terkena gaya angin (m^2)
- V = Kecepatan angin (m/s)

Nilai C_s dan C_h ditentukan berdasarkan pada bentuk dan ketinggian obyek yang terkena angin. Nilai dari koefisien C_s dan C_h dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.3 Shape Coefficients for Wind Force Calculations
(ABS MODU Part 3, 2001)

Shape of Structure	C_s
Spherical	0.40
Cylindrical Shapes (all sizes) used for crane pedestals, booms, helidecks, etc.	0.50
Hull, based on block projected area	1.00
Deck houses	1.00
Clusters of deck houses and other structures, based on block projected area.	1.10
Isolated structural shapes (e.g., cranes, angle channel beams, etc.)	1.50
Under deck areas (smooth)	1.00
Under deck surface (exposed beams and girders)	1.30
Rig derrick, each face, assuming fabricated from angle.	1.25

Tabel 2.4 Wind Pressure Height Coefficient Above the Design Water Surface
(ABS MODU Part 3, 2001)

Height (m)	Height (ft)	C_h
0.0-15.3	0-50	1.00
15.3-30.5	50-100	1.10
30.5-46.0	100-150	1.20
46.0-61.0	150-200	1.30
61.0-76.0	200-250	1.37
76.0-91.5	250-300	1.43
91.5-106.5	300-350	1.48

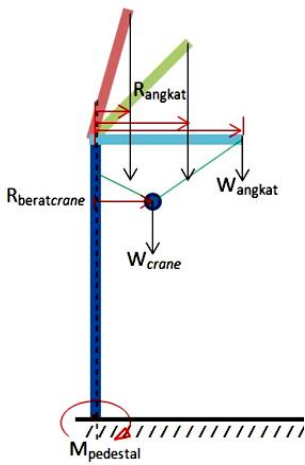
Pada tugas akhir ini digunakan nilai $C_s=0.5$ dan nilai $C_h=1.10$.

2.2.6 Beban Operasional

Crane beroperasi dengan cara mengangkat suatu benda atau beban, dengan mengaitkan beban tersebut pada ujung *boom* menggunakan *hook*. Saat pengangkatan terjadi, benda yang diangkat menghasilkan gaya akibat berat dan percepatan gravitasi,

sehingga dapat menimbulkan pembebanan pada *crane pedestal*. Selain berat beban yang diangkat, berat dari *crane* sendiri juga mempengaruhi pembebanan pada *crane pedestal*. Pada tugas akhir ini, beban operasional yang ditinjau adalah beban yang diangkat *crane* dan berat *crane* saja, dengan mengabaikan pergerakan *crane* dan *boom*.

Untuk melihat gaya yang bekerja, *crane pedestal* digambarkan dalam bentuk *Free Body Diagram* dan dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.18 Free Body Diagram Beban Operasional

Untuk menghitung beban operasional *crane* digunakan persamaan sebagai berikut:

$W = m \times g$(2.4)

dengan:

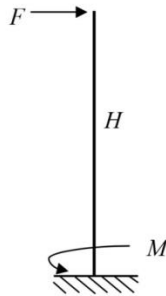
- W = Beban yang bekerja pada *crane* (N)
- m = Massa *crane* atau massa beban angkat (kg)
- g = Percepatan gravitasi (m/s^2)
= 9.81 m/s^2

Pemakaian *crane* termasuk pada operasi normal, yaitu dengan frekuensi penggunaan lebih dari 10 jam dan kurang dari

50 jam per bulan (API 2C, 2004), dengan asumsi crane bekerja selama 10 menit dalam satu kali operasi.

2.2.7 Momen Gaya

Pada saat suatu struktur diberi gaya, gaya tersebut memiliki kemampuan untuk menyebabkan struktur berotasi pada suatu titik pusat yang tidak segaris dengan gayanya (Hibbeler, 2013). Kemampuan gaya tersebut disebut dengan momen gaya. Pada tugas akhir ini, *crane pedestal* mengalami momen gaya pada sambungannya dengan dek anjungan akibat gaya-gaya pada struktur *crane* yang bekerja pada jarak tertentu dari dek. Momen gaya pada struktur dapat dijelaskan dengan bentuk gambar berikut:



Gambar 2.19 Momen Gaya pada Struktur
(Kadhafi, 2011)

Sedangkan besar dari momen gaya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$M = F \times lg \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan:

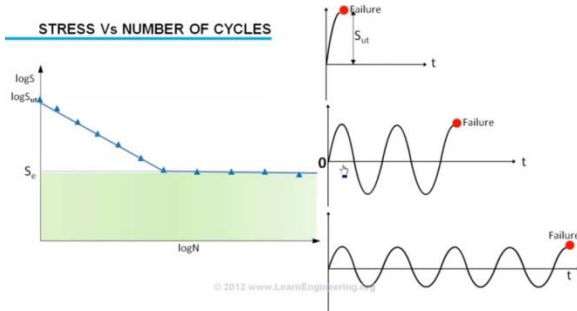
F = Gaya atau beban yang bekerja pada struktur (N)

lg = Panjang lengan (m), yaitu jarak tegak lurus yang ditarik dari poros rotasi sampai ke garis kerja gaya

2.2.8 Kelelahan

Kelelahan atau *fatigue* adalah suatu penyebab utama dari kegagalan yang terjadi pada struktur akibat beban dinamik yang

berfluktuasi dibawah *yield strength*, bersifat siklis dan terjadi dalam waktu yang lama.



Gambar 2.20 Kegagalan Akibat Pembebanan Siklis

(www.LearnEngineering.org)

Kegagalan akibat kelelahan yang terjadi akibat jumlah siklus tegangan $1-10^3$ dikategorikan sebagai *low-cycle*, sedangkan batasan untuk *high-cycle fatigue* umumnya lebih dari 10^3 . Kategori *high-cycle* umumnya dialami oleh struktur *crane* akibat beban kerja atau muatan yang diatasi dan bersifat berulang (Putra, 2015).

Untuk mengetahui umur kelelahan (*fatigue life*) suatu struktur (Geyer, 1986), terdapat beberapa komponen dasar dalam analisis, yaitu:

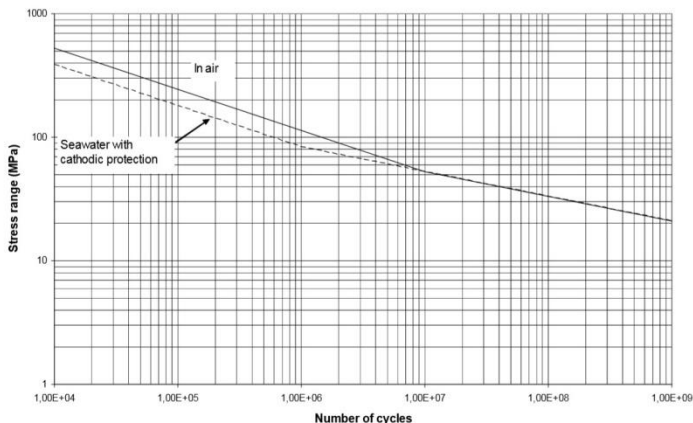
1. Karakterisasi siklus beban yang terjadi baik untuk kurun waktu pendek maupun kurun waktu panjang.
2. Perhitungan beban-beban siklis yang mengenai struktur.
3. Evaluasi siklus rentang tegangan pada suatu elemen yang ditinjau.
4. Perhitungan kerusakan pada elemen yang ditinjau akibat siklus rentang tegangan yang terjadi.
5. Evaluasi kekuatan elemen yang ditinjau.

Terdapat tiga metode umur kelelahan yang sering digunakan dalam proses desain maupun analisis, yaitu *stress-life method*, *strain-life method*, dan *linear-elastic fracture mechanics method* (Cahyono, 2018). Ketiga metode tersebut digunakan

untuk memprediksi umur kelelahan dalam satuan *cycle* (N) akibat suatu pembebanan tertentu dengan kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pada tugas akhir ini digunakan *stress-life method* dikarenakan kemudahan metode tersebut untuk diimplementasikan terhadap aplikasi desain yang luas serta data pendukung yang cukup.

Untuk mengetahui kekuatan *fatigue* dari sebuah material, dilakukan beberapa pengujian sesuai dengan karakteristik *fatigue* itu sendiri. Pengujian dilakukan dengan memberikan pembebanan di bawah kekuatan *ultimate* material tersebut. Selanjutnya diberikan beban yang lebih kecil secara berulang hingga spesimen patah. Kemudian hasil kekuatan *fatigue* diplot pada diagram S-N, yaitu plot dari besar suatu tegangan dengan siklus kegagalan terhadap suatu material.

Perhitungan efek kerusakan kumulatif pada anjungan menggunakan kurva S-N untuk *tubular joints* dengan mengabaikan efek korosi. Kurva S-N dapat dilihat pada grafik dan tabel berikut:



Gambar 2.21 Grafik Kurva S-N untuk *Tubular Joints*
(DnV RP-C203, 2008)

Nilai dari Kurva S-N juga dapat dicari dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\log N = \log \bar{a} - m \log S \dots\dots\dots(2.6)$$

dengan:

N = Perkiraan jumlah siklus kegagalan untuk rentang tegangan S

S = Rentang tegangan (MPa)

m = Garis kemiringan invers negatif (*negative inverse slope*) dari Kurva S-N

$\log \bar{a}$ = Perpotongan log N-axis dengan Kurva S-N

Sambungan antara *crane* dengan dek anjungan termasuk dalam sambungan *tubular joints to flat plate*. Untuk sambungan jenis tersebut, kurva yang digunakan adalah kurva D dengan nilai $m_1=3.0$ dan $\log \bar{a}_1=12.164$ untuk jumlah siklus $N \leq 10^7$, serta nilai $m_2=5.0$ dan $\log \bar{a}_2=15.606$ untuk jumlah siklus $N > 10^7$.

Table 2-1 S-N curves in air						
S-N curve	$N \leq 10^7$ cycles		$N > 10^7$ cycles	Fatigue limit at 10^7 cycles *)	Thickness exponent k	Structural stress concentration embedded in the detail (S-N class), ref. also equation (2.3.2)
	m_1	$\log \bar{a}_1$	$\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$			
B1	4.0	15.117	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	12.164	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0	1.00

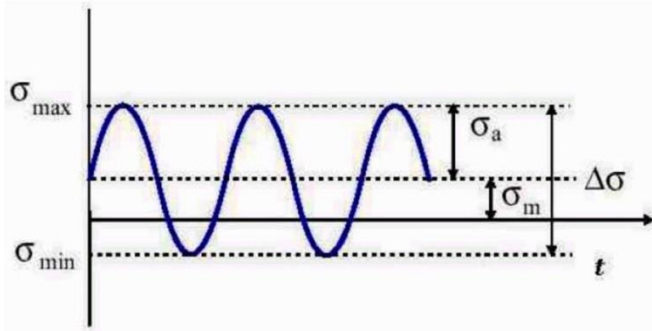
*) see also section 2.10

Gambar 2.22 Tabel Kurva S-N Berdasarkan Jenis Tipe Sambungan
(DnV RP-C203, 2008)

Diagram S-N suatu material didapat dari dua jenis pengujian spesimen (Cahyono, 2018). Yang pertama adalah *fully reversed* ($N=1$), yaitu pembebanan berulang secara tarik dan tekan dengan besar yang sama. Beban dihilangkan setelah dilakukan proses tarik dan tekan secara bergantian. Yang kedua adalah *zero to maximum* atau *zero to minimum* ($N=\frac{1}{2}$), yaitu pembebanan dilakukan hanya secara tarik atau tekan dan beban dihilangkan setelah pembebanan tersebut.

2.2.8.1 Pengaruh Pembebanan

Saat suatu logam mengalami pembebanan bersifat siklis, parameter yang berpengaruh terhadap kelelahan logam tersebut antara lain tegangan rata-rata (σ_m), tegan amplitudo (σ_a), dan frekuensi pembebanan.



Gambar 2.23 Tegangan Siklis

(Akuan, 2007)

Berdasarkan grafik di atas, didapat beberapa persamaan berikut:

a. Tegangan rata-rata : $S_m = \sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2}$ (2.7)

b. Tegangan amplitudo : $S_a = \sigma_a = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2}$ (2.8)

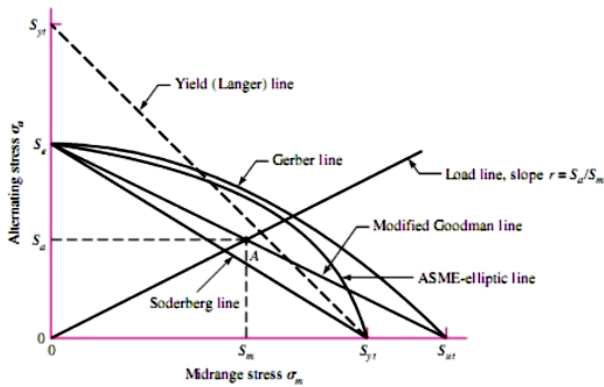
c. Rasio tegangan : $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ (2.9)

d. Rasio amplitudo : $A = \frac{S_a}{S_m}$ (2.10)

Hubungan rasio tegangan dengan rasio amplitudo adalah:

- $R = -1$; $A = \infty$ (kondisi *fully reversed*)
- $R = 0$; $A = 1$ (kondisi *zero to maximum*)
- $R = \infty$; $A = -1$ (kondisi *zero to minimum*)

Besar tegangan rata-rata yang bekerja menentukan besar tegangan amplitudo yang diizinkan untuk mencapai umur kelelahan tertentu. Selebihnya dapat dijelaskan dengan melihat diagram berikut:



Gambar 2. 24 Diagram Batas Tegangan terhadap Kelelahan Logam
(Akuan, 2007)

Persamaan yang digunakan untuk diagram tersebut yaitu:

a. *Soderberg* : $\frac{\sigma_a}{\sigma'_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1$ (2.11)

b. *Goodman* : $\frac{\sigma_a}{\sigma'_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1$ (2.12)

c. *Gerber* : $\frac{\sigma_a}{\sigma'_e} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2 = 1$ (2.13)

d. *Morrow* : $\left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_f}\right)^2 = 1$ (2.14)

dengan:

σ'_e = *Effective alternating stress*

σ_y = *Yield stress*

σ_u = *Ultimate stress*

σ_f = *True fracture stress*

Pada tugas akhir ini digunakan metode *Gerber* karena material yang dianalisis memiliki sifat *ductile*.

2.2.8.2 Metode Palmgren-Miner

Perkiraan umur kelelahan didasarkan pada beban fluktuasi yang akan diterima struktur selama masa operasi. Sehingga untuk mengetahui sisa umur kelelahan struktur dapat dilakukan setelah memperoleh informasi kondisi beban yang diterima struktur

selama operasi. Sisa umur kelelahan strukur dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan *Palmgren-Miner*.

Metode *Palmgren-Miner* merupakan metode konvensional yang digunakan pada analisis kelelahan, yaitu memperhitungkan secara kumulatif kegagalan yang terjadi akibat pembebanan pada suatu struktur. Metode ini digunakan untuk menghitung indeks kelelahan yang berkorelasi langsung dengan umur kelelahannya. Konsep ini memungkinkan perhitungan kerusakan *fatigue* dengan beberapa amplitudo atau pola pembebanan berbeda. Selain itu, konsep *Palmgren-Miner* tidak bergantung pada jumlah siklus, sehingga cocok digunakan untuk material yang memiliki nilai *endurance limit*.

Persamaan yang digunakan dalam Metode *Palmgren-Miner* (Boonstra, *et al.*, 2002) adalah sebagai berikut:

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \dots \dots \dots (2.15)$$

dengan:

D = Rasio kerusakan kumulatif

m = Total (Σ) dari interval-interval rentang tegangan

n_i = Jumlah *cycle* kolom interval rentang tegangan i dengan harga S_i yang sebenarnya terjadi, dari rentang distribusi tegangan jangka panjang akibat beban eksternal

N_i = Jumlah *cycle* rentang tegangan dengan harga S_i yang menyebabkan kegagalan. Harga besaran ini dapat diperoleh dari kurva S-N

Setelah didapat total rasio kumulatif dari pembebanan yang ada pada struktur, maka formulasi umur kelelahan dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{Umur Kelelahan} = L_f = 1/D \dots \dots \dots (2.16)$$

Sesuai dengan hukum *Palmgren-Miner*, kegagalan sambungan akan terjadi jika indeks kerusakan D mencapai harga 1,0.

2.2.9 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah suatu metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan fisika matematis. Metode ini menghasilkan persamaan untuk mendapatkan penyelesaian pendekatan dari nilai yang tidak diketahui pada titik tertentu dalam suatu sistem yang kontinyu, yaitu kondisi struktur yang sebenarnya. Proses pemodelan dari struktur disebut dengan diskritisasi, yaitu membagi struktur ke dalam elemen-elemen kecil atau elemen hingga yang terhubung oleh titik-titik (*nodes*) yang digunakan elemen-elemen tersebut sebagai batas dari struktur. Dalam metode elemen hingga, persamaan dari seluruh sistem dibentuk dari penggabungan persamaan elemen-elemennya.

Metode elemen hingga digunakan untuk menyelesaikan dua jenis permasalahan, yaitu masalah struktural dan non-struktural. Masalah struktural meliputi analisis tegangan, regangan, *buckling*, getaran, dan lain-lain. Sedangkan masalah non-struktural meliputi perpindahan panas dan massa, mekanika fluida, dan sebagainya.

Keunggulan metode elemen hingga untuk penyelesaian masalah struktur diantaranya:

1. Memodelkan bentuk yang kompleks.
2. Menyelesaikan kondisi pembebanan umum.
3. Menggunakan berbagai macam ukuran elemen dalam *meshing* atau diskritisasi.
4. Memodelkan efek dinamis.
5. Menyelesaikan kelakuan tidak linier dari geometri dan material.

2.2.9.1 Matriks Kekakuan

Ketika suatu model elemen diberikan beban, diperlukan persamaan yang menghubungkan antara beban berupa gaya yang diberikan pada nodal elemen dengan perpindahan berupa translasi pada nodal tersebut. Hubungan tersebut ditunjukkan dengan persamaan berikut:

$$\{F\} = [K]\{d\} \dots\dots\dots(2.17)$$

dengan:

$\{F\}$ = Matriks kolom gaya dan momen pada nodal elemen

$[K]$ = Matriks kekakuan elemen

$\{d\}$ = Matriks kolom berisi perpindahan translasi nodal elemen

Persamaan kesetimbangan gaya yang bekerja dapat dirumuskan menjadi persamaan berikut:

$$f_{1x} = k(d_{1x} - d_{2x}) \dots \dots \dots (2.18)$$

$$f_{2x} = k(d_{2x} - d_{1x}) \dots \dots \dots (2.19)$$

Persamaan di atas dapat dituliskan dalam bentuk matriks menjadi:

$$\begin{Bmatrix} f_{1x} \\ f_{2x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{1x} \\ d_{2x} \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (2.20)$$

2.2.9.2 Prosedur dan *Software* Berbasis Metode Elemen Hingga

Analisis *crane pedestal* pada penelitian ini menggunakan *software* berbasis Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Methods* (FEM). Ketika metode elemen hingga diterapkan pada bidang analisis tertentu, seperti analisis tegangan, termal, atau getaran, maka analisis tersebut disebut sebagai analisis elemen hingga atau *Finite Element Analysis* (FEA). Penggunaan *software* untuk melakukan analisis elemen hingga meliputi:

1. Menentukan permasalahan, jenis analisis yang dibutuhkan, serta tipe *mesh* terkait penelitian.
2. Membuat pemodelan geometri beserta penentuan jenis material yang digunakan untuk pemodelan yang akan dianalisis.
3. Melakukan *meshing*. Sebelumnya dilakukan terlebih dahulu penentuan kualitas dengan cara menentukan bentuk elemen dan jumlah *nodes*. Ukuran elemen yang lebih kecil akan menghasilkan kualitas *mesh* tinggi, sehingga hasil analisis menjadi lebih akurat.
4. Menentukan kondisi batas (*boundary condition*), meliputi pemberian jenis tumpuan sesuai dengan kondisi nyata seperti *fixed support*, *clamp*, dan lainnya.

5. Menentukan kondisi pembebanan (*load condition*), meliputi jenis dan lokasi pembebanan sesuai dengan kondisi nyata seperti gaya, momen, dan lainnya.
6. Melakukan analisis hasil berdasarkan simulasi pemodelan yang telah dilakukan.
7. Menginterpretasikan hasil yang didapat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

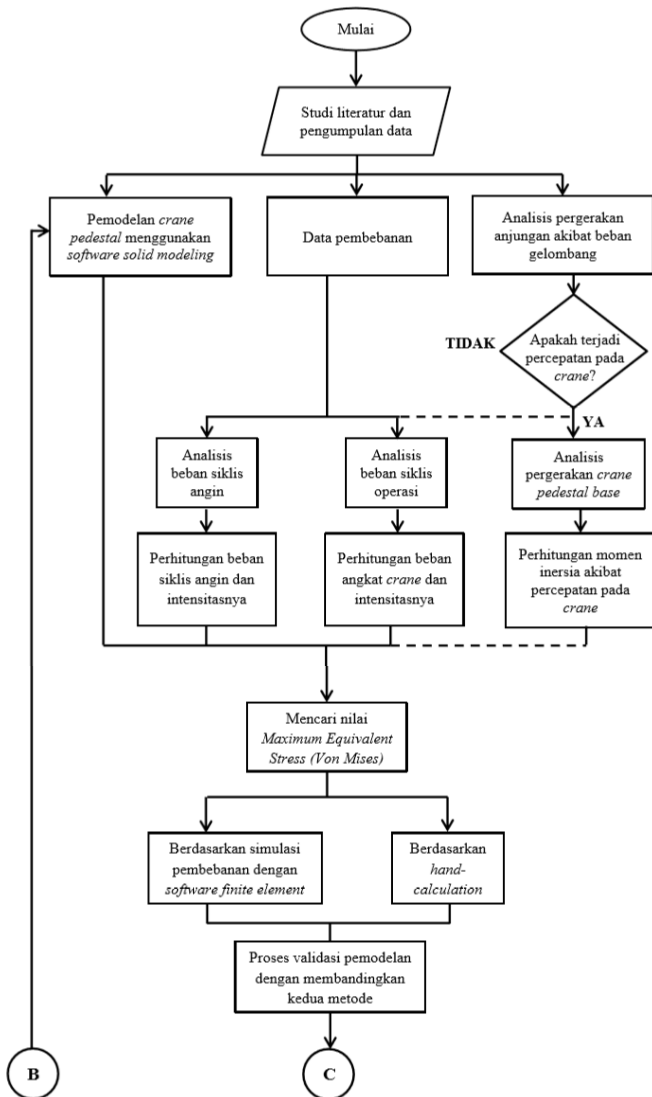
METODE PENELITIAN

3.1 Prosedur Penelitian

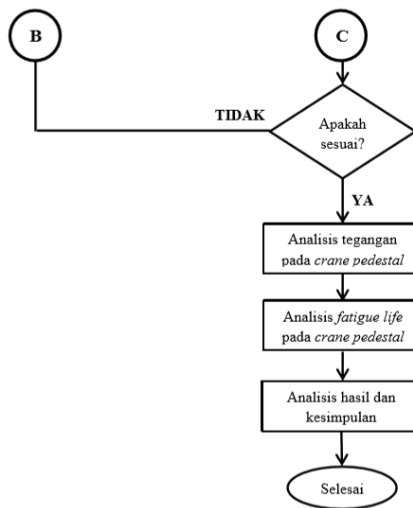
Pada penelitian ini, dilakukan beberapa tahapan untuk menunjang proses analisis secara keseluruhan. Penelitian dimulai dengan mengumpulkan studi literatur dari sumber berupa buku, jurnal, penelitian, maupun tugas akhir terdahulu yang berkaitan dengan topik penelitian ini. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data berupa data geometri dari obyek yang akan diteliti (anjungan dan *crane*) serta data lingkungan sekitar obyek (data angin dan gelombang laut perairan Selat Madura) dan data pemakaian *crane*. Kemudian dilakukan pemodelan lokal *crane pedestal* menggunakan *software solid modeling* serta analisis pembebanan berdasarkan data intensitas pembebanan yang sudah didapat. Sebelumnya dilakukan pengecekan mengenai percepatan yang terjadi pada *crane pedestal base* akibat pergerakan anjungan. Jika terbukti bahwa pergerakan anjungan memiliki pengaruh terhadap *crane pedestal base*, maka percepatan yang timbul pada *crane pedestal* akibat beban gelombang pada anjungan harus diperhitungkan. Jika terbukti bahwa pergerakan anjungan masih dalam batas yang disyaratkan, maka *crane pedestal base* dianggap *fixed* dan analisis cukup menggunakan *Finite Element Analysis* dengan memperhitungkan beban angin dan beban operasional pada *crane* saja. Selanjutnya dilakukan validasi pemodelan yaitu membandingkan nilai *Maximum Equivalent Stress (Von Mises)* hasil analisis *software finite element* dengan perhitungan tangan. Jika pemodelan dinyatakan telah valid, maka dilanjutkan dengan analisis tegangan dan perhitungan umur kelelahan berdasarkan *load condition* yang ada. Tahap akhir yaitu analisis hasil dan penarikan kesimpulan.

3.2 Diagram Alir

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir dalam bentuk diagram dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir dan Analisis



Gambar 3.1 Diagram Alir dan Analisis

3.3 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan pedalaman materi melalui berbagai buku, jurnal ilmiah, serta laporan penelitian terdahulu terkait dengan analisis kekuatan struktur dan kelelahan. Buku yang digunakan salah satunya yaitu *Handbook of Offshore Engineering* (S. Chakrabarti, 2005). Untuk jurnal ilmiah yang digunakan salah satunya adalah “Respon Dinamis Nonlinier Struktur *Tension Leg Platform* Akibat Gaya Gelombang” (R.W. Prastianto, 2003). Sedangkan untuk laporan penelitian terdahulu yang digunakan salah satunya yaitu “Studi Kelelahan *Crane Pedestal* FPSO Belanak Akibat Respon Dinamik Gerakan Beban Angkat pada *Crane*” oleh Muammar Kadhafi (2011).

3.4 Pengumpulan Data

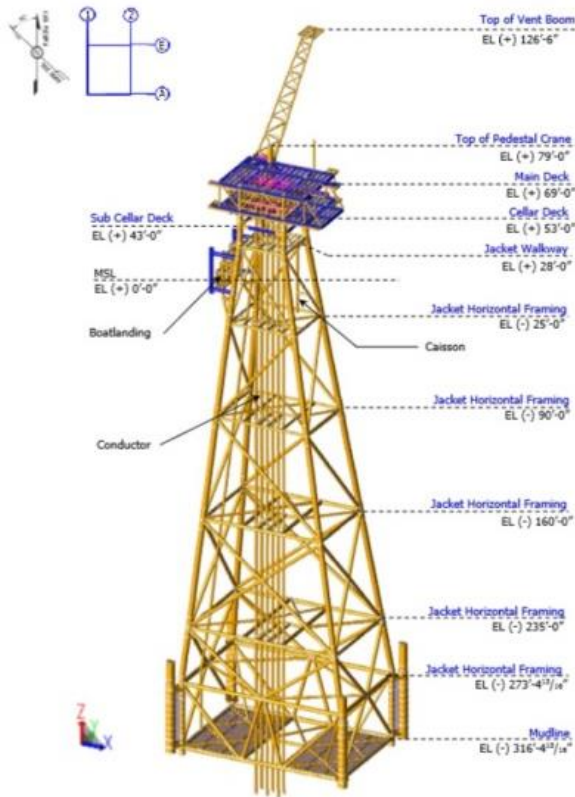
Sebagai penunjang penelitian ini dibutuhkan beberapa data sebagai *input*. Data tersebut diantaranya data struktural berupa spesifikasi anjungan dan *crane*. Selain itu dikumpulkan juga data lingkungan berupa intensitas kejadian gelombang, angin, dan arus tempat anjungan beroperasi. Pengumpulan data dilakukan melalui wawancara tim ahli perusahaan, kunjungan lapangan pada saat proses *assembly* di Serang, Banten, dan beberapa dokumen seperti dokumen data dan *design drawing* milik perusahaan.

3.4.1 Data Struktural

Berikut ini merupakan data struktural dari obyek penelitian yaitu *crane pedestal* beserta anjungan terpancang.

3.4.1.1 Struktur Anjungan

Untuk mempermudah memahami bentuk dari struktur *jacket* dan *topside* secara *visual*, anjungan beserta elevasi dari masing-masing *level* digambarkan dengan pemodelan menggunakan *software* analisis struktur bangunan lepas pantai yang dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3.1 Pemodelan Anjungan Lepas Pantai Terpancang

(Sumber: Dokumen HCML)

Sebagai penunjang penelitian ini, spesifikasi dan data anjungan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.1 Spesifikasi Anjungan Lepas Pantai Terpancang

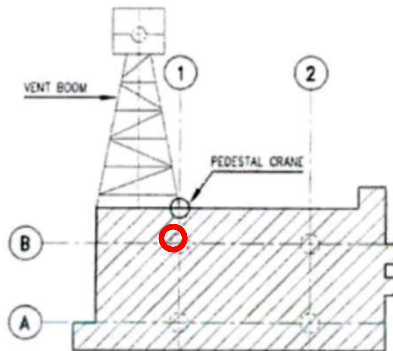
(Sumber: Dokumen HCML)

Tahun Instalasi	2018
Operator	Husky-CNOOC Madura Ltd.
Tipe	<i>Wellhead</i>
Lokasi	Selat Madura
Jacket	<i>4 Legged Jacket Structure</i>

Kedalaman Perairan	316.4 ft	
<i>Topside</i>	Main Deck EL. (+) 69'-0" Cellar Deck EL. (+) 53'-0" Sub-Cellar Deck EL. (+) 43'-0"	
Berat	<i>Jacket</i>	1694.72 Mt
	<i>Topside</i>	463.3 Mt
	<i>Vent Boom</i>	33 Mt
Tipe Pile	<i>Grouted</i>	
Penetrasi	295 ft	
Konduktor	6 buah	
Riser	1 buah	

3.4.1.2 Struktur Pedestal Crane

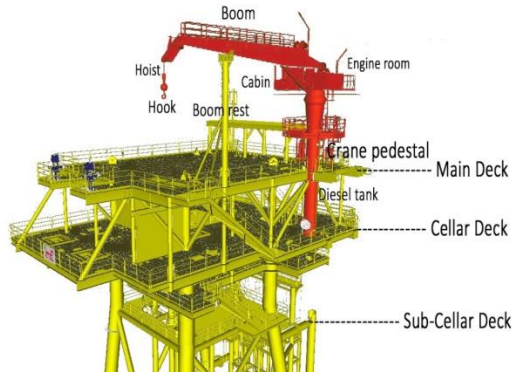
Pada anjungan, satu buah *pedestal crane* terpasang pada *main deck row 1* bagian utara dari anjungan.



Gambar 3.2 Letak Pedestal Crane pada Anjungan

(Sumber: Dokumen HCML)

Untuk mempermudah mengetahui letak *pedestal crane* pada dek utama anjungan secara *visual*, *crane* digambarkan dengan pemodelan menggunakan *software 3D design review* yang dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3.3 Pedestal Crane pada Dek Utama Anjungan

Pada penelitian ini akan dilakukan analisa kelelahan lokal pada *crane* bagian *pedestal*. Spesifikasi dan data *pedestal crane* sebagai obyek utama penelitian dapat dilihat pada tabel berikut:

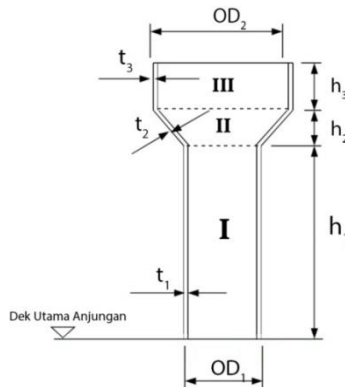
Tabel 3.2 Spesifikasi Pedestal Crane

(Sumber: Dokumen HCML)

Tipe		<i>Fixed Length Box Boom Cylinder Crane</i>
Berat	<i>Dry</i>	26.2 ton
	<i>Operating</i>	27.5 ton
Safe Working Load		5 ton
Panjang		16.490 m
Tinggi		9.673 m (hingga boom)
Hoisting speed pada saat beban penuh		22 m/min
Radius kerja maksimum		13.7m
Radius kerja minimum		3.1m
Tinggi hoisting		40.6m
Luffing time		~60s
Slewing speed		~1r/min
Diesel engine	Model	6CT8.3-D (M)
	Power	122 KW
	Speed	1500r/min

	Start Method	1 st <i>Battery Electric Starter</i> 2 nd <i>auxiliary hydraulic accumulator (Hand Pump) starter</i>
Operating wind speed		28.3 m/s
Design life		20 tahun

Berikut ini merupakan konfigurasi dari silinder *crane pedestal* yang akan dianalisis:



Gambar 3. 4 Konfigurasi Crane Pedestal

(Sumber: Dokumen HCML)

Tabel 3.3 Geometri dan Properti Material Silinder Crane Pedestal

(Sumber: Dokumen HCML)

Silinder	I	II	III
Outer Diameter (OD)	1.04 m	1.04 m – 1.41 m	1.41 m
Thickness (t)	31.75 mm	31.75 mm	31.75 mm
Height (h)	3.05 m	0.55 m	0.50 m
Modulus of elasticity	29,733 ksi		
Steel density	490.00 lb/ft ³		
Pedestal yield stress	50 ksi		

3.4.2 Data Lingkungan

Berikut ini merupakan data gelombang dan angin di sekitar daerah anjungan terpancang beroperasi.

3.4.2.1 Data Gelombang

Data kecepatan gelombang yang diketahui yaitu tinggi gelombang maksimum (H_{max}) dan periode pada gelombang maksimum (T_{Hmax}) berdasarkan *return period* gelombang 1 tahun dan 100 tahun, disajikan dalam tabel sebagai berikut:

Tabel 3.4 H_{max} dan T_{Hmax} Berdasarkan Return Period Gelombang

(Sumber: Dokumen HCML)

Design Value	Return Period (Omni Direction)	
	1 yr	100 yr
Height, H_{max} (ft)	17.62	32.81
Period, T_{Hmax} (s)	6.33	7.93

Data di atas dijadikan *input* pada *software* analisis struktur bangunan lepas pantai untuk mendapatkan pembebanan gelombang pada anjungan.

3.4.2.2 Data Angin

Data kecepatan angin yang diketahui yaitu intensitas kejadian angin di daerah perairan Madura selama setahun untuk 8 mata angin pada elevasi 1 m. Kejadian angin dilihat per jam.

Tabel 3.5 Intensitas Kejadian Angin Selama 1 Tahun pada Elevasi 1m

(Sumber: Dokumen HCML)

Arah Datang	Kecepatan Angin (m/s) dan Intensitas (Jam)					
	<5.5	5.5-8.0	8.0-10.8	10.8-13.9	>13.9	Total
U	77	5	0	0	0	82
TL	126	21	0	0	0	147
T	799	2176	369	4	0	3348
TG	787	1340	91	0	0	2218
S	327	36	0	0	0	363
BD	485	195	45	5	0	730
B	735	625	210	53	3	1626
BL	200	45	4	1	0	250
Windy						8764
Windless						0

<i>Unrecorded</i>	0
Total	8764

3.4.2.3 Data Beban Angkat

Dalam satu bulan, *crane* beroperasi selama lebih dari 10 jam dan tidak lebih dari 50 jam, dan dalam satu kali operasi diperkirakan *crane* bekerja selama 10 menit. Dalam tugas akhir ini diasumsikan *crane* beroperasi selama 50 jam dalam sebulan dengan jumlah bulan dalam setahun beroperasi selama 12 bulan.

Sesuai data operasional *pedestal crane* yang diasumsikan di atas, maka:

- 1 cycle = 5 menit/1 cycle
- Rata-rata cycle/jam = 1 cycle/10 menit x 60 menit/1 jam
= 12 cycle/jam
- Rata-rata cycle/bulan = 12 cycle/jam x 24 jam/hari x 30 hari/bln
= 8,640 cycle/bulan
- Rata-rata cycle/tahun = 8,640 cycle/bulan x 12 bulan/tahun
= 103,680 cycle/tahun

Untuk beban operasi *crane*, terlebih dahulu dicari rasio penggunaan *crane* untuk berbagai berat beban yang diangkat. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya, didapat siklus penggunaan *crane* selama umur desain yaitu 20 tahun sebanyak 2,073,600 kali.

Dengan mengasumsikan pengangkatan *crane* dilakukan secara merata pada setiap radius kerja dengan beban maksimum, spektrum *crane lift* dari *crane* pada anjungan diasumsikan dalam bentuk persentase dapat dilihat dalam tabel sebagai berikut:

Tabel 3.6 Spektrum Angkat Crane

Load (T)	Percentage (%) of Total Number of Cycles at				Total
	3.1m RAD	6m RAD	10m RAD	13.7m RAD	
10	25	25	25	25	100.0

Sehingga untuk menghitung jumlah siklus beban angkat *crane* tiap radius dan tiap beban angkat, maka dilakukan perhitungan dengan mengalikan jumlah total penggunaan *crane* selama duapuluh tahun dengan spektrum angkat *crane* untuk setiap radius dan beban angkat.

Tabel 3.7 Intensitas Penggunaan Crane

Load (T)	Number of Cycles at				Total
	3.1m RAD	6m RAD	10m RAD	13.7m RAD	
10	518,400	518,400	518,400	518,400	2,073,600

3.5 Pembebanan

Pembebanan yang dianalisis diantaranya yaitu:

3.5.1 Perhitungan Beban gelombang

Untuk memperhitungkan efek dinamis gelombang, maka perioda alami anjungan perlu dihitung untuk kemudian dibandingkan dengan perioda gelombang. Hasil analisis dinamis (*modal analysis*) anjungan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.8 Modal Analysis Anjungan Terpancang

(Sumber: Dokumen HCML)

Natural Period (s)	2.87
Wave Period (s)	6.33

Berdasarkan *API RP-2A* (2000), untuk perioda alami anjungan di bawah 3 detik tidak perlu melakukan analisis gelombang dinamis (*Dynamic Wave Analysis*), dan cukup menggunakan *Dynamic Amplification Factor (DAF)* yang sesuai dengan karakteristik gelombang dan struktur anjungan.

Dengan memasukkan nilai perioda alami anjungan dan perioda gelombang, didapatkan nilai *DAF*:

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{2.87}{6.33}\right)^2\right\}^2 + \left(2 \times 0.02 \times \frac{2.87}{6.33}\right)^2}}$$

$$= 1.26$$

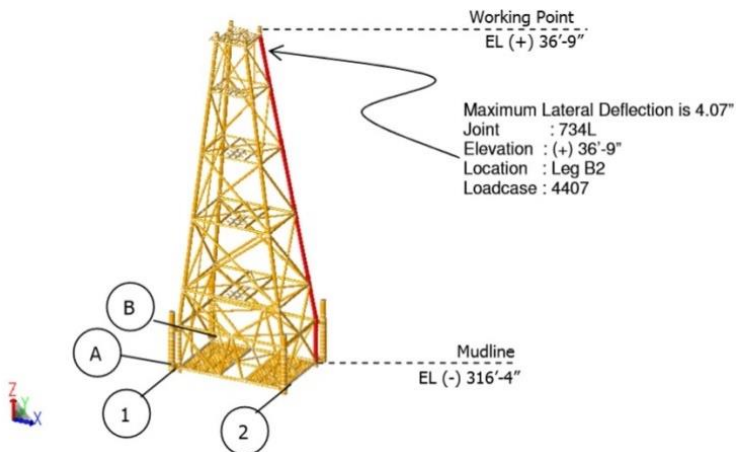
Faktor amplifikasi ini kemudian disertakan dalam analisis struktur.

Analisis hasil simulasi dengan bantuan *software* analisis struktur bangunan lepas pantai (SACS) yang dilakukan oleh perusahaan menunjukkan defleksi maksimum yang terjadi akibat beban-beban yang bekerja, termasuk beban lingkungan seperti gelombang laut, adalah 4.07" (=102.16mm). Defleksi tersebut mengakibatkan terjadinya inklinasi vertikal sebesar 0.054°. Hasil tersebut sudah memperhitungkan efek amplifikasi akibat gerakan dinamis gelombang terhadap anjungan. Hasil disajikan dalam bentuk tabel sebagai berikut:

Tabel 3. 9 Defleksi Leg B2 Akibat Beban Gelombang

(Sumber: Dokumen HCML)

Elevasi	Panjang Leg (ft)	Defleksi Resultan (ft)	Defleksi yang Diperbolehkan (H/200) (ft)	Remarks
Mudline (-)316'	358.32	0.339	1.7916	OK



Gambar 3.5 Maximum Lateral Deflection

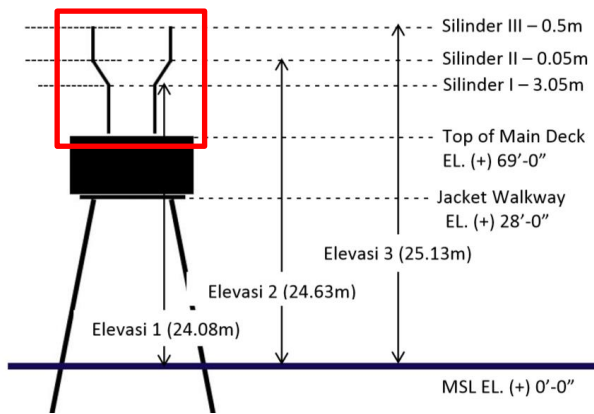
(Sumber: Dokumen HCML)

Hasil analisis menunjukkan bahwa simpangan yang terjadi pada *leg* masih dibawah batas yang diperbolehkan ($H/200$). Sehingga dapat disimpulkan bahwa kekakuan struktur anjungan terhadap kasus-kasus pembebanan masih dalam batas yang disyaratkan oleh *API* sebagai anjungan terpancang (*fixed platform*).

3.5.2 Perhitungan Beban Angin

Pada perhitungan beban angin, beban yang ditinjau adalah gaya angin yang bekerja pada *crane* ditambah dengan berat *crane* tanpa beban, yaitu pada saat *crane* sedang tidak beroperasi. Gaya angin yang dianalisis merupakan gaya yang dipengaruhi oleh bentuk dan ketinggian benda. Dari perhitungan gaya angin dan data siklus beban angin, maka akan diketahui *fatigue*. Sebelum perhitungan gaya angin, dilakukan perhitungan kecepatan di tiap-tiap elevasi dari silinder *crane pedestal*.

Elevasi yang diperhitungkan dalam mencari kecepatan angin dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3.6 Elevasi Silinder *Crane Pedestal*

3.5.2.1 Kecepatan Angin

Data kecepatan angin yang diketahui yaitu data kecepatan angin awal V_0 berdasarkan arah datangnya di wilayah anjungan serta intensitas angin selama setahun dalam jam. Data kecepatan angin awal (V_0) yang tersedia belum sesuai dengan ketinggian silinder, sehingga dicari terlebih dahulu kecepatan angin pada elevasi ketiga silinder yang telah ditentukan sebelumnya dengan menggunakan Persamaan (2.2). Untuk simulasi, beban yang digunakan adalah gaya angin pada tiap elevasi.

Kecepatan yang dianalisis ditentukan dengan mengambil kecepatan maksimum untuk tiap *range* kecepatan angin pada elevasi 1m. Karena kecepatan awal yang diketahui adalah kecepatan angin pada elevasi 1m, maka dicari terlebih dahulu kecepatan angin pada elevasi 10m dengan mengubah persamaan menjadi sebagai berikut:

$$V_1 = V_{10} \times \left(\frac{y}{10}\right)^{\frac{1}{7}}$$

$$V_{10} = \frac{V_1}{\left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{1}{7}}}$$

Konversi kecepatan angin pada 10m disajikan dalam bentuk tabel berikut ini:

Tabel 3.10 Konversi Kecepatan Angin pada Elevasi 10m

Kecepatan Angin (m/s)	
Elevasi 1m	Elevasi 10m
0	0
5.5	7.64
8.0	11.12
10.8	15.01
13.9	19.31
17.3	24.04

Contoh perhitungan kecepatan angin 5.5m/s pada elevasi 24.08 adalah sebagai berikut:

$$V = V_0 \times \left(\frac{y}{10}\right)^{\frac{1}{7}}$$

$$V = 7.64 \times \left(\frac{24.08}{10}\right)^{\frac{1}{7}}$$

$$V = 8.66 \text{ m/s}$$

Hasil yang didapat dari perhitungan kecepatan angin pada tiap elevasi disajikan dalam bentuk tabel berikut ini:

Tabel 3.11 Kecepatan Angin Elevasi Silinder

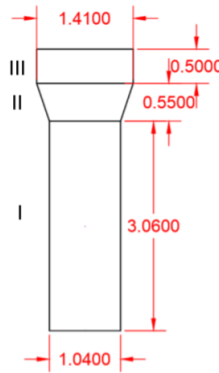
Kecepatan (m/s)	Kecepatan pada Elevasi y (m/s)			
	Ketinggian (m)			
	24.08	24.63	25.13	29.895
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.5	8.66	8.69	8.71	8.93
8.0	12.61	12.65	12.68	13.00
10.8	17.02	17.07	17.12	17.55
13.9	21.89	21.96	22.03	22.58
17.3	27.26	27.34	27.42	28.11

dengan 24.08m, 24.63m, dan 25.13m masing-masing merupakan ketinggian dari silinder I, II, dan III, serta 29.895m merupakan ketinggian dari *crane boom*.

3.5.2.2 Gaya Angin pada *Crane Pedestal* dan *Boom*

Luasan area yang terkena beban angin pada masing-masing silinder *pedestal* dan *crane boom* dicari dengan perhitungan sebagai berikut.

- *Crane Pedestal*



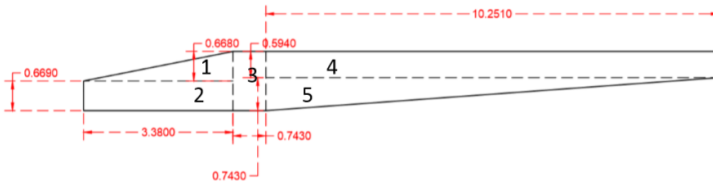
$$A_{III} = 1.41 \times 0.50 = 0.7 \text{ m}^2$$

$$A_{II} = (1.04 \times 0.55) + \left[\frac{1}{2} \times (1.41 - 1.04) \times 0.55 \right]$$

$$= 0.67 \text{ m}^2$$

$$A_I = 1.04 \times 3.06 = 3.17 \text{ m}^2$$

- *Crane Boom*



$$A_1 = \frac{1}{2} \times 3.38 \times 0.668 = 1.129 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 3.38 \times 0.669 = 2.261 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 1.337 \times 0.743 = 0.993 \text{ m}^2$$

$$A_4 = 10.251 \times 0.594 = 6.089 \text{ m}^2$$

$$A_5 = \frac{1}{2} \times 10.251 \times 0.743 = 3.808 \text{ m}^2$$

$$A_{total} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$$

$$\begin{aligned}
 &= 1.129 + 2.261 + 0.993 + 6.089 + 3.808 \\
 &= 14.28 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Setelah didapat luasan dari masing-masing silinder yang terkena beban angin, selanjutnya dihitung gaya angin akibat beban tersebut. Contoh perhitungan gaya angin pada silinder I dengan kecepatan angin 5.5m/s adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{1}{2} \times \rho \times C_s \times C_h \times A \times V^2 \\
 F &= \frac{1}{2} \times 1.226 \times 0.5 \times 1.1 \times 3.17 \times 8.66^2 \\
 F &= 80.15 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Hasil yang didapat dari perhitungan gaya angin pada tiap elevasi disajikan dalam tabel berikut ini:

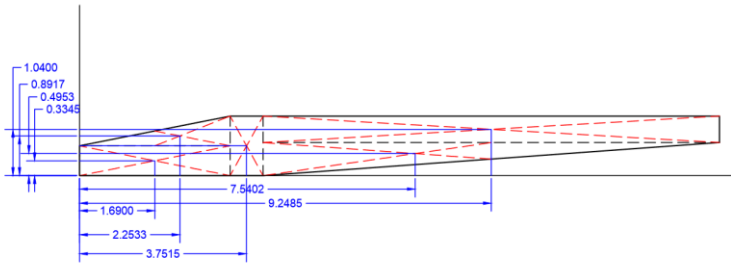
Tabel 3.12 Gaya Angin Tiap Elevasi

Kecepatan (m/s)	Gaya Angin pada Elevasi y (N)			
	Silinder dengan Ketinggian (m)			
	24.08	24.63	25.13	29.895
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.5	80.15	17.06	17.90	384.26
8.0	169.95	36.15	37.95	814.04
10.8	309.60	65.82	69.17	1483.19
13.9	512.12	108.93	114.54	2454.72
17.3	794.21	168.85	177.44	3804.57

Hasil gaya pada ketiga silinder yang telah didapat digunakan sebagai *input* pada *software finite element*. Sedangkan untuk *crane boom*, dihitung terlebih dahulu momen pada *crane pedestal* akibat gaya pada *crane boom*.

3.5.2.3 Momen akibat Gaya Angin pada *Crane Boom*

Gaya pada *crane boom* yang didapatkan dari perhitungan sebelumnya merupakan beban terpusat pada titik berat *boom*. Kemudian beban terpusat pada *crane boom* dipindahkan ke ujung *boom* sehingga menghasilkan momen pada *crane pedestal*. Sebelumnya dicari terlebih dahulu titik berat dari *crane boom*.



Gambar 3.7 Titik Berat Crane Boom

Koordinat dari masing-masing titik berat dan luas per bagian disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 3.13 Koordinat Titik Berat dan Luas Bagian Crane Boom

Bagian	x	y	A
1	2.2533	0.8917	1.129
2	1.69	0.3345	2.261
3	3.7515	0.6685	0.993
4	9.2485	1.04	6.089
5	7.5402	0.4953	3.808

Perhitungan titik berat total struktur dalam koordinat X dan Y adalah sebagai berikut:

- Koordinat X

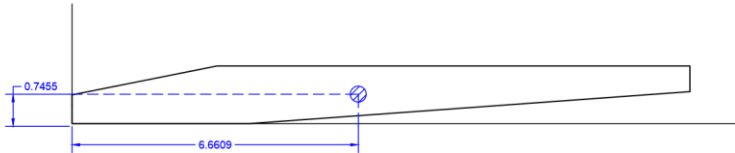
$$\begin{aligned}
 X &= \frac{(A_1x_1) + (A_2x_2) + \dots + (A_5x_5)}{(A_1 + A_2 + \dots + A_5)} \\
 &= \frac{(1.129 \times 2.2533) + (2.261 \times 1.69) + \dots + (3.808 \times 7.5402)}{(1.129 + 2.261 + \dots + 3.808)} \\
 &= 6.6609
 \end{aligned}$$

- Koordinat Y

$$\begin{aligned}
 Y &= \frac{(A_1y_1) + (A_2y_2) + \dots + (A_5y_5)}{(A_1 + A_2 + \dots + A_5)} \\
 &= \frac{(1.129 \times 0.8917) + (2.261 \times 0.3345) + \dots + (3.808 \times 0.4953)}{(3.1824 + 0.051 + \dots + 3.808)}
 \end{aligned}$$

$$Y = 0.7455$$

Sehingga letak titik berat dari total *crane* dan *boom* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3.8 Titik Berat Total Crane Boom

Setelah didapatkan titik berat total *crane* dan boom, dapat dihitung momen pada *crane pedestal* akibat beban terpusat pada *crane boom*. Contoh perhitungan untuk beban terpusat 384.258 N yaitu:

$$\begin{aligned} M &= W \times lg \\ &= 384.258 \times 6.6609 \\ &= 2,559.5 \text{ Nm} \end{aligned}$$

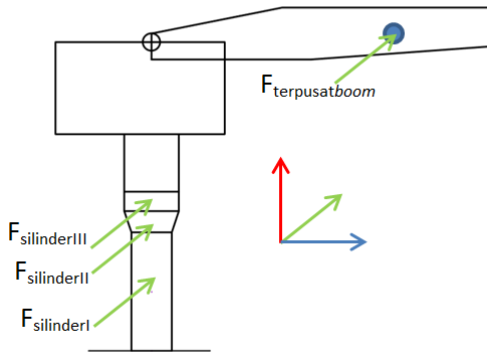
Hasil perhitungan momen pada *crane pedestal* akibat beban terpusat pada *crane boom* dengan kecepatan angin berbeda disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 3.14 Momen Gaya pada Crane Pedestal akibat Beban Terpusat pada Crane Boom

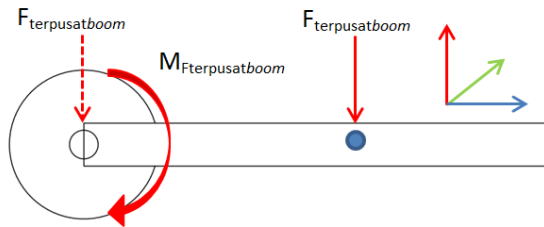
Kecepatan (m/s)	Gaya pada Boom (N)	Momen (Nm)
5.5	384.258	2,559.5
8	814.041	5,422.24
10.8	1483.194	9,879.39
13.9	2454.716	16,350.6
17.3	3804.570	25,341.8

Hasil perhitungan beban terpusat pada *crane boom* serta momen gaya pada *crane pedestal* yang telah didapat digunakan sebagai *input* pada *software finite element*.

Total *input* pada *software finite element* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3.9 Input Pembebanan Angin pada Crane Tampak Samping



Gambar 3.10 Input Pembebanan Angin pada Crane Tampak Atas

3.5.3 Perhitungan Beban Operasional

Beban operasional *crane* ditinjau pada berat *crane* bagian atas yang ditumpu *pedestal* dan beban yang diangkat oleh *crane* saja, dengan mengabaikan pergerakan *crane* dan *boom*. Dari berat *crane* dan beban angkat *crane* akan diketahui gaya aksial yang bekerja pada *crane pedestal* serta momen gaya yang terjadi akibat gaya tersebut pada sambungan *crane pedestal* dengan dek anjungan. Sehingga dalam simulasi, beban yang digunakan adalah beban aksial dan momen.

3.5.3.1 Gaya Aksial

Gaya aksial pada *crane pedestal* diakibatkan oleh berat *boom* dan beban angkat *crane*. Pada tugas akhir ini ditinjau beban aksial pada saat *crane* tidak mengangkat beban serta dengan beban.

a. Berat *Crane* Tanpa Beban

Berat dari *crane* bagian atas *pedestal* adalah 23.618 ton, sehingga gaya aksial akibat berat *crane* adalah:

$$\begin{aligned} F_{crane} &= m \times g \\ &= 23,618 \times 9.81 \\ &= 231,695 \text{ N} \end{aligned}$$

b. Berat *Crane* Dengan Beban

Crane memiliki SWL sebesar 5 Ton. Pada analisis kelelahan *crane*, diperhitungkan juga *safety factor* berupa *load factor* untuk kondisi dinamis sebesar $SF=2.0$. Sehingga beban yang diangkut pada analisis kelelahan *crane* adalah:

$$\begin{aligned} m &= SWL \times SF \\ &= 5,000 \times 2 \\ &= 10,000 \text{ kg} \end{aligned}$$

Perhitungan untuk mencari beban angkat dengan massa 10 Ton adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} F_{beban} &= m \times g \\ &= (10,000 + 23,618) \times 9.81 \\ &= 329,795 \text{ N} \end{aligned}$$

Hasil gaya aksial total yang telah didapat digunakan sebagai *input* pada *software finite element*.

3.5.3.2 Momen Gaya

Selain gaya aksial, *crane pedestal* juga mengalami momen akibat gaya yang bekerja pada titik-titik dengan panjang lengan gaya tertentu dari *pedestal*. Gaya aksial yang terjadi baik saat *crane* dengan beban maupun tanpa beban menghasilkan momen gaya. Momen gaya ditinjau masing-masing dari kedua kondisi tersebut.

a. Momen Gaya Tanpa Beban

Momen akibat berat *boom* dapat dihitung dengan mengalikan berat *boom* dengan lengan gaya yaitu jarak dari titik berat *boom* ke *crane pedestal*. Perhitungan tersebut dapat dilihat sebagai berikut:

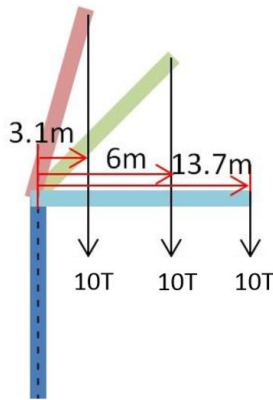
$$\begin{aligned} M_{boom} &= W \times lg \\ &= (23,618 \times 9.81) \times 6.6609 \\ &= 1,543,297 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Hasil momen gaya total yang telah didapat digunakan sebagai *input* pada *software finite element*.

b. Momen Gaya Dengan Beban

Beban angkat maksimum dioperasikan dengan empat radius kerja *boom* yang berbeda. Contoh perhitungan untuk mencari momen akibat gaya dengan beban angkat 10 Ton dan radius kerja *boom* 3.1m adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} M_{total} &= (F \times lg)_{beban} + M_{boom} \\ &= (10,000 \times 9.81 \times 3.1) + 1,543,297 \\ &= 1,847,407 \text{ Nm} \end{aligned}$$



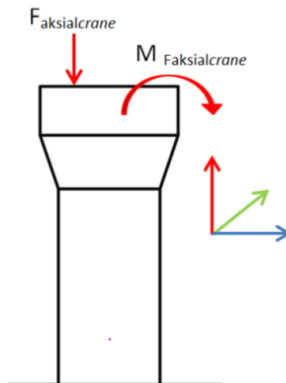
Gambar 3. 11 Free Body Diagram Beban Operasional

Hasil perhitungan momen akibat gaya angkat dengan empat radius kerja *boom* masing-masing disajikan pada tabel berikut ini:

Tabel 3.15 Momen Gaya Angkat

Load (T)	Momen pada (Nm)			
	3.1m RAD	6m RAD	10m RAD	13.7m RAD
10	1,847,407	2,131,897	2,524,297	2,887,267

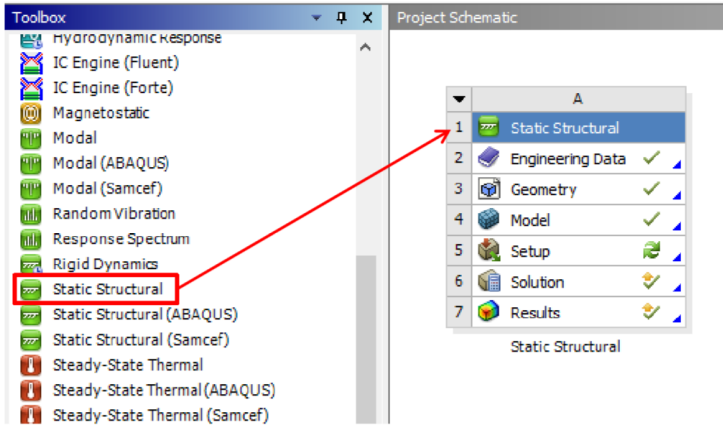
Total *input* pada *software finite element* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3. 12 Input Pembebanan Operasional Tampak Samping

3.6 Simulasi Pembebanan dan Analisis Kelelahan

Pemodelan *crane pedestal* dengan menggunakan *software finite element* dengan jenis pemodelan *Static Structural*.



Gambar 3.13 Tampilan Jendela Software Finite Element

Tahap simulasi untuk analisis kelelahan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

3.6.1 Karakteristik Material

Baja dan material struktur lainnya ditentukan berdasarkan standar *Structural Materials Specifications* atau dari data yang ada pada *drawing* yang berkaitan. Properti material yang digunakan untuk desain adalah sebagai berikut:

Tabel 3.16 Properti Material untuk Desain

(Sumber: Dokumen HCML)

Material	Property	Value
Steel	Density	7,850 kg/m ³
	Modulus of elasticity	206,843 MPa
	Shear modulus	76,923 MPa
	Poisson's ration	0.3
	Coefficient of thermal expansion	1.17E-5/°C

Material	Property	Value
	Design yield strength	Type I*) – 248 MPa Type II**) – 345 MPa

*) Type I – Mild Steel

**) Type II – High Strength Steel

Tabel 3.17 Tegangan yang Diperbolehkan Berdasarkan Jumlah Siklus

(Sumber: AISC 9th Edition, 1989)

Number of Loading Cycles		Allowable Stress Range (MPa)
From	To	
20,000	100,000	193
100,000	500,000	110
500,000	2,000,000	69
Over 2,000,000		48

Input pada *software finite element* dapat dilihat pada gambar berikut:

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D E
	Property	Value	Unit	
1				
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	K ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Mod...		
8	Young's Modulus	2E+05	MPa	
9	Poisson's Ratio	0.3		
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa	
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
13	Interpolation	Log-Log		
14	Scale	1		
15	Offset	0	MPa	
16	Strain-Life Parameters			
24	Tensile Yield Strength	344.74	MPa	
25	Compressive Yield Strength	344.74	MPa	
26	Tensile Ultimate Strength	460	MPa	
27	Compressive Ultimate Strength	0	MPa	

Gambar 3.14 Properti Material Structural Steel

Nilai dari siklus dan rentang tegangan yang digunakan pada bar *Alternating Stress Mean Stress* dihitung dengan

menggunakan Rumus 2.6 dengan nilai $\log \bar{a}_i$ dan m_i berdasarkan data *structural steel* untuk *tubular joints to flat plate* pada Gambar 2.21 Contoh perhitungan rentang tegangan untuk jumlah siklus $N \leq 10^7$ adalah sebagai berikut:

$$\log(10) = 12,164 - [3 \times \log(S)]$$




$$S = 5264.2 \text{ MPa}$$

Sedangkan contoh perhitungan rentang tegangan untuk jumlah siklus $N > 10^7$ adalah sebagai berikut:

$$\log(2.36 \times 10^9) = 15,606 - [5 \times \log(S)]$$

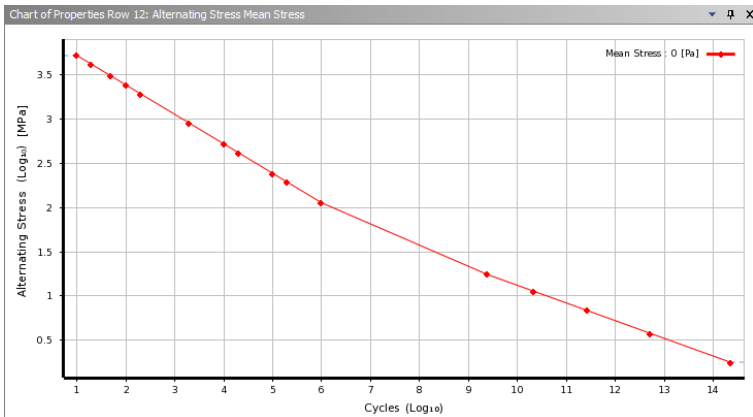
$$S = 17.65 \text{ MPa}$$

Sehingga didapat tabel sebagai berikut:

Table of Properties Row 12: Alternating Stress Mean Stress		
	A	
1	Mean Stress (Pa) 	
2	0	
*		
	B	C
1	Cycles 	Alternating Stress (MPa) 
2	10	5264.2
3	20	4178.2
4	50	3078.5
5	100	2443.4
6	200	1939.4
7	2000	900.17
8	10000	526.42
9	20000	417.82
10	1E+05	244.34
11	2E+05	193.94
12	1E+06	113.41
13	2.36E+09	17.65
14	2.11E+10	11.39
15	2.62E+11	6.882
16	5.25E+12	3.777
17	2.24E+14	1.783
*		

Gambar 3.15 Tabular Alternating Stress Mean Stress Material Structural Steel untuk Tubular Joints

Maka dari *tabular* pada Gambar 3.18 didapatkan kurva S-N sebagai berikut:



Gambar 3.16 Kurva S-N *Structural Steel* untuk *Tubular Joints to Flat Plate*

3.6.2 Pemodelan Geometri

Proses pemodelan geometri *crane pedestal* dilakukan dengan menggunakan *software solid modeling*, lalu di-*export* ke *software finite element* sebelum dilakukan analisis. Untuk memudahkan visualisasi, *crane* beserta *beam* pada dek yang berperan sebagai penjepit *crane pedestal* dimodelkan sebagai berikut:



Gambar 3.17 Pemodelan Geometri *Crane Pedestal*

Untuk menyederhanakan proses simulasi, pemodelan yang digunakan hanya *pedestal* dan *top ring* saja, dengan mengabaikan kelima *beam* yang ada.

3.6.3 Diskritisasi (*Meshing*)

Diskritisasi atau *meshing* merupakan salah satu tahapan dari metode elemen hingga, yaitu membagi suatu benda menjadi bagian-bagian yang lebih kecil. Pada *software finite element*, suatu benda didiskritisasi hingga puluhan bahkan ribuan elemen.

Dalam menentukan jumlah dan ukuran elemen *meshing* yang akan dipakai, dibutuhkan proses uji konvergensi. Proses ini meliputi pemilihan jenis metode dan bentuk elemen *meshing*,

relevance center, *span angle*, ukuran elemen *meshing*, dan jenis *output* yang diinginkan. Kemudian proses uji konvergensi dilakukan dengan menentukan kondisi batas serta memasukkan beban maksimum dari *load condition* yang telah ditentukan. Hasil konvergensi adalah jumlah *nodes*, elemen, *process time*, dan sesuai metode *stress-fatigue* yang digunakan pada tugas akhir ini, maka *output* yang diinginkan adalah *maximum equivalent stress*.

Proses dimulai dengan melakukan iterasi, dengan memasukkan satu nilai ukuran elemen, lalu nilai-nilai berikutnya yang lebih kecil. Ukuran elemen paling kecil dengan nilai *error* dan *process time* minimal akan diterapkan dalam proses simulasi.

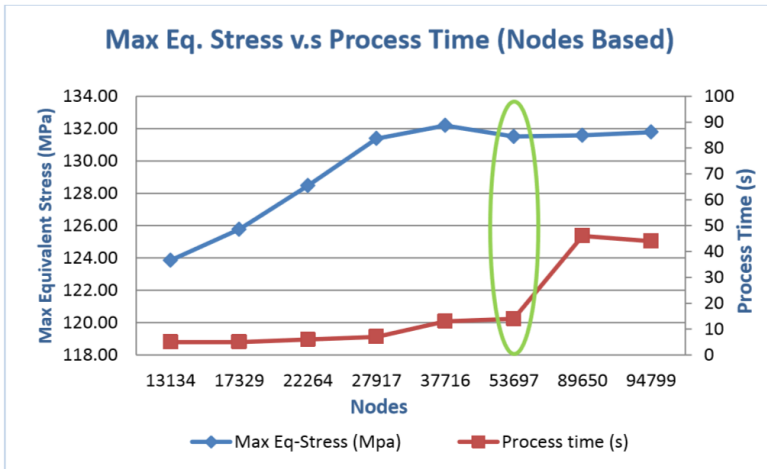
Uji konvergensi pada tugas akhir ini akan membandingkan hasil *meshing* dengan menggunakan *span angle coarse* dan *medium*. Setelah didapat hasil masing-masing pengujian, keduanya dibandingkan dengan mengurutkan jumlah *nodes*. Kemudian dipilih *meshing* dengan jumlah *nodes* terkecil pada titik dimana *equivalent stress* yang dialami benda mulai konvergen.

Metode yang digunakan adalah *Hex Dominant* dengan *size function Adaptive* dan *relevance center Fine*.

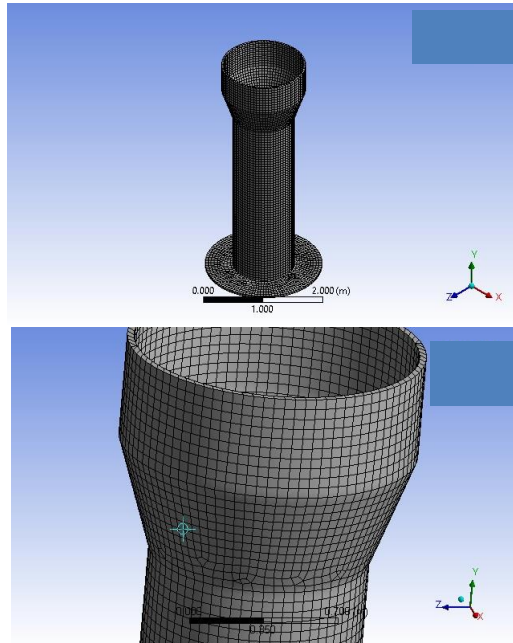
Hasil dari kedua pengujian dapat dilihat dibawah ini:

Tabel 3. 18 Hasil Uji Konvergensi *Span Angle Coarse*

Element size (mm)	Max Eq. Stress (MPa)	Nodes	Elements	Process time (s)	Max Eq. Stress Error (%)
100	123.85	13134	2409	5	-
90	125.77	17329	3248	5	1.526
80	128.47	22264	4710	6	2.101
70	131.38	27917	5199	7	2.214
60	132.19	37716	6957	13	0.612
50	131.51	53697	10289	14	0.053
40	131.58	89650	19138	46	0.053
38	131.78	94799	19014	44	0.151



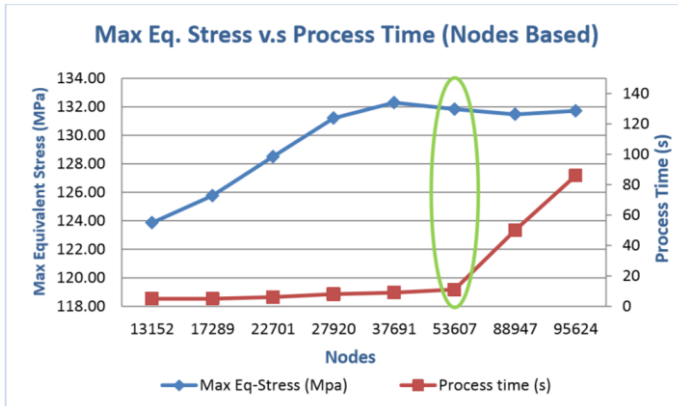
Gambar 3.18 Grafik Hasil Uji Konvergensi *Span Angle Coarse*



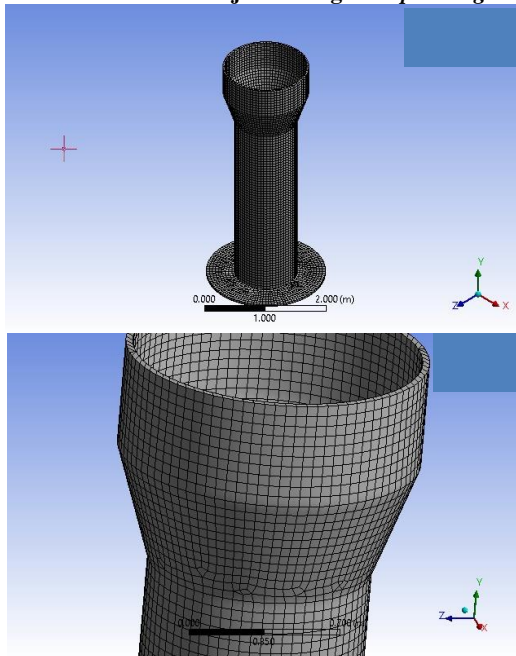
Gambar 3.19 Meshing Ukuran Elemen 50mm *Span Angle Coarse*

Tabel 3.19 Hasil Uji Konvergensi *Span Angle Medium*

Element size (mm)	Max Eq. Stress (MPa)	Nodes	Elements	Process time (s)	Max Eq. Stress Error (%)
100	123.86	13152	2413	5	-
90	125.76	17289	3223	5	1.510
80	128.50	22701	4743	6	2.132
70	131.20	27920	5179	8	2.057
60	132.29	37691	6942	9	0.823
50	131.83	53607	10236	11	0.348
40	131.47	88947	18696	50	0.273
38	131.71	95624	18895	86	0.182



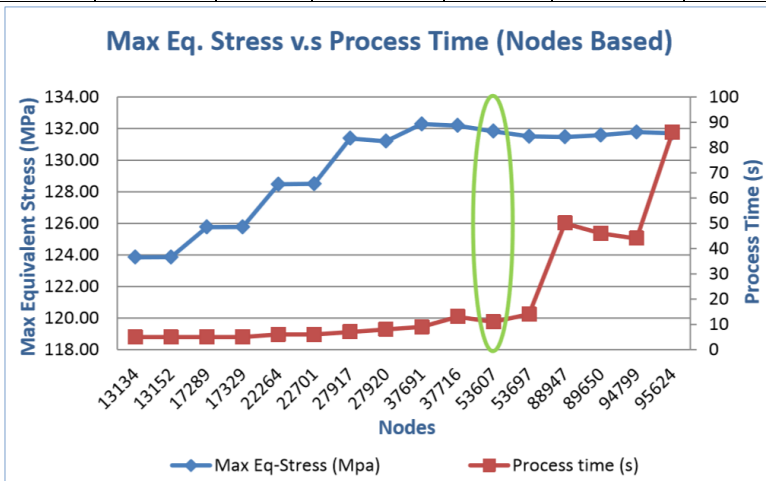
Gambar 3.20 Grafik Hasil Uji Konvergensi *Span Angle Medium*



Gambar 3.21 *Meshing* Ukuran Elemen 50mm *Span Angle Medium*

Tabel 3.20 Hasil Uji Konvergensi dengan Pengurutan Jumlah Nodes

Span Angle	Element size (mm)	Nodes	Elements	Process time (s)	Max Eq. Stress (MPa)	Error (%)
Coarse	100	13134	2409	5	123.85	-
Med	100	13152	2413	5	123.86	0.0080
Med	90	17289	3223	5	125.76	1.5108
Coarse	90	17329	3248	5	125.77	0.0079
Coarse	80	22264	4710	6	128.47	2.1016
Med	80	22701	4743	6	128.50	0.0233
Coarse	70	27917	5199	7	131.38	2.1921
Med	70	27920	5179	8	131.20	0.1371
Med	60	37691	6942	9	132.29	0.8239
Coarse	60	37716	6957	13	132.19	0.0756
Med	50	53607	10236	11	131.83	0.2730
Coarse	50	53697	10289	14	131.51	0.2433
Med	40	88947	18696	50	131.47	0.0304
Coarse	40	89650	19138	46	131.58	0.0835
Coarse	38	94799	19014	44	131.78	0.1517
Med	38	95624	18895	86	131.71	0.0531

**Gambar 3. 22 Grafik Hasil Uji Konvergensi dengan Pengurutan Jumlah Nodes**

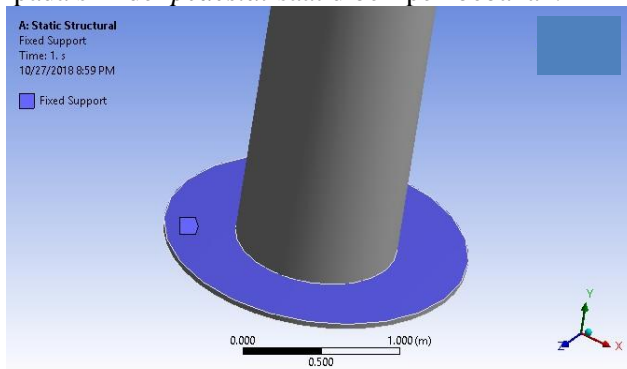
Sehingga dapat disimpulkan, *meshing* yang dipakai dalam tugas akhir memiliki ketentuan sebagai berikut:

Tabel 3.21 Metode Meshing Akhir

<i>Size Function</i>	<i>Adaptive</i>
<i>Relevance Center</i>	<i>Fine</i>
<i>Span Angle</i>	<i>Medium</i>
<i>Element Size (mm)</i>	50
<i>Nodes</i>	53607
<i>Elements</i>	10236
<i>Average Mesh Metrics</i>	0.68039

3.6.4 Kondisi Batas

Kondisi batas yang diberikan pada obyek yang dianalisis adalah tumpuan *fixed support* pada bagian atas *top ring* dari *crane pedestal*. Tujuannya adalah agar tidak ada perpindahan yang terjadi pada silinder *pedestal* saat diberi pembebanan.



Gambar 3.23 Kondisi Batas *Fixed Support* pada *Top Ring Pedestal Base*

3.6.5 Kondisi Pembebanan

Terdapat 13 kondisi pembebanan dengan melakukan variasi terhadap beban angkat dan radius *boom* untuk beban operasional, serta variasi ketinggian silinder dan *crane boom* untuk beban angin. Intensitas kejadian dinyatakan dalam jumlah siklus atau

jam selama umur desain (20 Tahun). Kondisi pembebanan tersebut antara lain:

Tabel 3.22 Kondisi Pembebanan Operasional

<i>Load Condition</i>	Beban (Ton)	Radius (m)	Gaya (N)	Momen (Nm)	Siklus
			Tanpa Beban	Tanpa Beban	
1	10	3.1	231,695	1,543,297	518,400
2		6	231,695	1,543,297	518,400
3		10	231,695	1,543,297	518,400
4		13.7	231,695	1,543,297	518,400
			Dengan Beban	Dengan Beban	
5		3.1	329,795	1,847,407	518,400
6		6	329,795	2,131,897	518,400
7		10	329,795	2,524,297	518,400
8		13.7	329,795	2,887,267	518,400

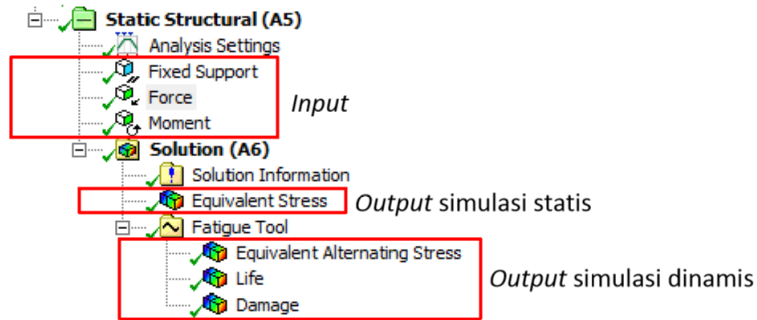
Tabel 3.23 Kondisi Pembebanan Angin

<i>Load Condition</i>	9	10	11	12	13
Kecepatan Angin (m/s)	5.5	8	10	13.9	17.3
F_{24.08} (N)	80.15	169.95	309.6	512.12	794.21
F_{24.63} (N)	17.06	36.15	65.82	108.93	168.85
F_{25.13} (N)	17.9	37.95	69.17	114.54	177.44
M_{boom} (Nm)	2,559.503	5,422.237	9,879.394	16,350.59	25,341.8
F_{boom} (N)	384.258	814.041	1483.194	2454.716	3804.57
F_{selfweight} (N)	231,695	231,695	231,695	231,695	231,695
M_{selfweight} (Nm)	1,543,297	1,543,297	1,543,297	1,543,297	1,543,297
Siklus (Jam)	70,720	88,860	14,380	1,260	60

3.6.6 Analisis

Analisis statis dilakukan pada saat simulasi pembebanan untuk mendapatkan tegangan ekuivalen *Von Mises*. Setelah dilakukan simulasi statis, proses analisis dilanjutkan dengan simulasi dinamis yaitu analisis kelelahan menggunakan *Fatigue Tool* pada bar *Solution* untuk mengetahui *fatigue life (cycle)* dan

fatigue damage. Tipe analisis yang digunakan yaitu *Stress-Life* dan *Mean Stress Theory Gerber*.



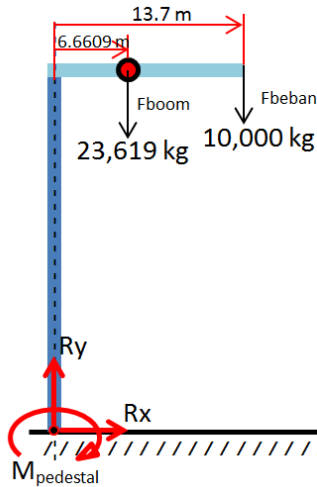
Gambar 3.24 Outline Simulasi pada Software Finite Element

3.7 Validasi

Validasi pemodelan dilakukan dengan menghitung reaksi gaya dan reaksi momen yang pada tumpuan *crane pedestal* serta besar *maximum equivalent stress (von-Mises)* pada *pedestal* menggunakan *hand-calculation*. Hasil dari perhitungan *hand-calculation* dibandingkan dengan besar reaksi yang didapat dari hasil simulasi pada *software finite element*.

A. Reaksi Gaya dan Momen

Proses validasi pertama dilakukan dengan menghitung reaksi gaya dan momen dengan menggunakan *load condition* beban operasional maksimum, yaitu beban aksial dan momen gaya dengan radius kerja 13.7 m.



Gambar 3.25 Free Body Diagram dari Pedestal Crane

- Data yang Diketahui

$$F_{beban} = 10,000 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \\ = 98,100 \text{ N}$$

$$F_{boom} = 23,619 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \\ = 231,695 \text{ N}$$

- Reaksi Gaya

$$\rightarrow (+) \sum F_x = 0 \\ R_x = 0$$

$$\uparrow (+) \sum F_y = 0 \\ R_y - F_{beban} - F_{boom} = 0 \\ R_y = F_{beban} + F_{boom} \\ = 98,100 + 231,695 \\ R_y = 329,795 \text{ N}$$

- Reaksi Momen

$$\uparrow \rightarrow (+) \sum M = 0$$

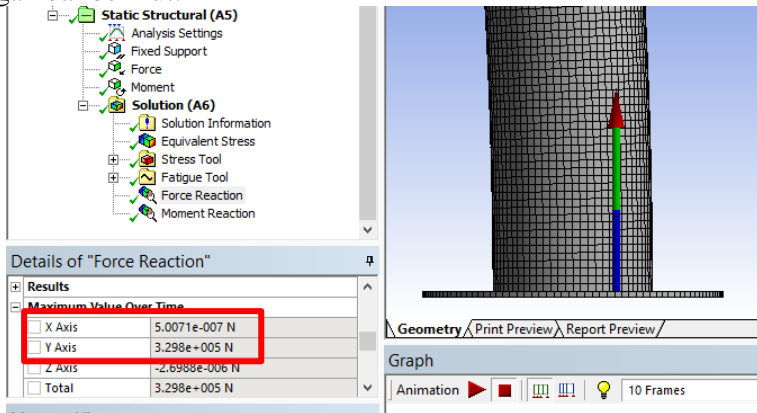
$$(F_{boom} \cdot L_{boom}) + (F_{beban} \cdot L_{beban}) + M_{pedestal} = 0$$

$$M_{pedestal} = -(F_{boom} \cdot L_{boom}) - (F_{beban} \cdot L_{beban})$$

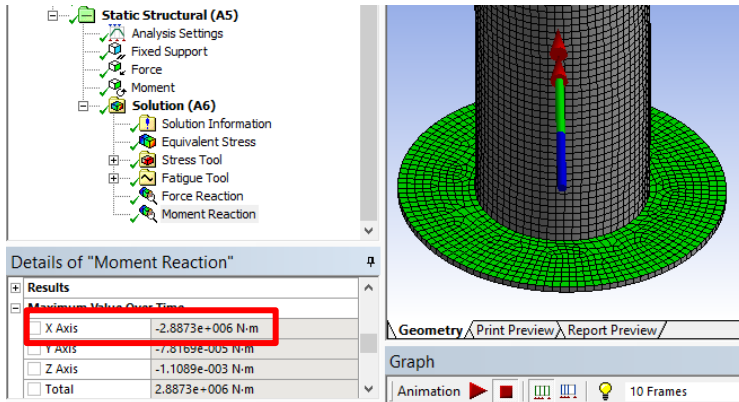
$$= -(98,100 \times 13.7) - (231,695 \times 6.6609)$$

$$M_{pedestal} = -2,887,276 \text{ Nm}$$

Sedangkan untuk hasil dari simulasi dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3.26 Hasil Analisis Reaksi Gaya dengan *Software Finite Element*

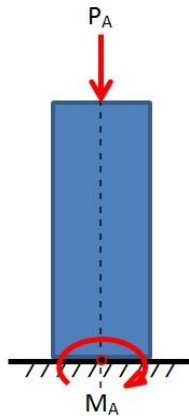


Gambar 3.27 Hasil Analisis Reaksi Momen dengan Software Finite Element

Hasil simulasi menunjukkan nilai yang sudah sesuai dengan hasil *hand-calculation*, sehingga dapat dilanjutkan ke proses validasi berikutnya.

B. *Maximum Equivalent Stress (von-Mises)*

Proses validasi selanjutnya dilakukan dengan mencari *Maximum Equivalent Stress (Von Mises)* menggunakan *load condition* beban operasional maksimum, yaitu beban aksial dan momen gaya.



Gambar 3.28 Free Body Diagram Silinder

- Data yang Diketahui

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\pi}{4} \times (DO^2 - DI^2) \\
 &= \frac{\pi}{4} \times (1.04^2 - 0.9765^2) \\
 &= 0.101 \text{ m}^2 \\
 I &= \frac{\pi}{64} \times (DO^4 - DI^4) \\
 &= \frac{\pi}{64} \times (1.04^4 - 0.9765^4) \\
 &= 0.0128 \text{ m}^4 \\
 c &= \frac{D}{2} \\
 &= \frac{1.04}{2} \\
 &= 0.52 \text{ m} \\
 P &= -318,830 \text{ N} \\
 M &= -1,478,019 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

dimana:

$$\begin{aligned}
 A &= \text{Luas penampang silinder terkecil} \\
 I &= \text{Area momen inersia} \\
 c &= \text{Jari-jari silinder} \\
 P &= \text{Beban aksial} \\
 M &= \text{Momen gaya}
 \end{aligned}$$

- Tegangan Silinder

$$\begin{aligned}\sigma_A &= \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} \\ &= -\left(\frac{318,830}{0.101} + \frac{1,478,019 \times 0.52}{0.0128}\right) \\ &= -6.32 \times 10^7 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

- Tegangan *Principal*

$$\begin{aligned}\sigma_{1,2} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ &= \frac{-6.32 \times 10^7}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{-6.32 \times 10^7}{2}\right)^2} \\ &= -3.16 \times 10^7 \pm (-3.16 \times 10^7) \\ \sigma_1 &= -6.32 \times 10^7 \text{ N/m}^2 \\ \sigma_2 &= 0 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

- *Maximum Equivalent Stress (Von Mises)*

$$\begin{aligned}\sigma_V &= \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \\ &= \sqrt{(-6.32 \times 10^7)^2 + 0^2 - 0} \\ &= -6.32 \times 10^7 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

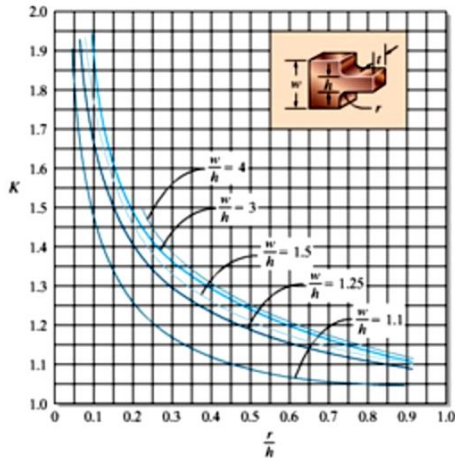
- *Stress Concentration Factor*

Karena terjadi perubahan luas penampang dari silinder I hingga silinder III, maka *Stress Concentration Factor* (SCF) perlu diperhitungkan.

$$\frac{w}{h} = \frac{1.41}{1.04} = 1.356$$

Dengan mengasumsikan perubahan luas penampang tidak memiliki radius ($r/h = 0$), nilai K adalah maksimum yaitu $K = 2.0$, sehingga:

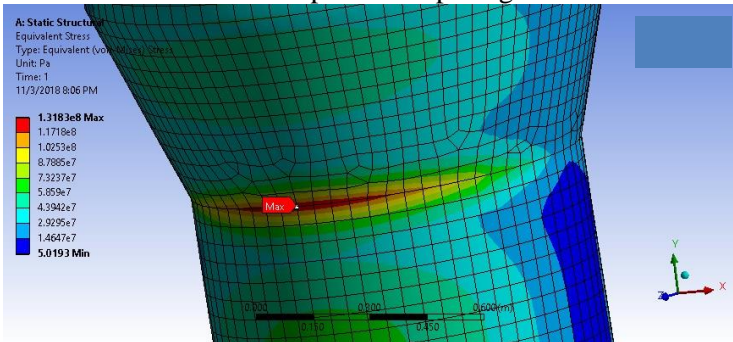
$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= K \sigma_V \\ \sigma_{max} &= 2 \times (6.32 \times 10^7) \\ \sigma_{max} &= 1.264 \times 10^8 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$



Gambar 3.29 Nilai K pada Struktur dengan Perubahan Ukuran Luas Penampang

(R.C. Hibbeler, 2011)

Hasil dari simulasi dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3.30 Hasil Analisis dengan Software Finite Element

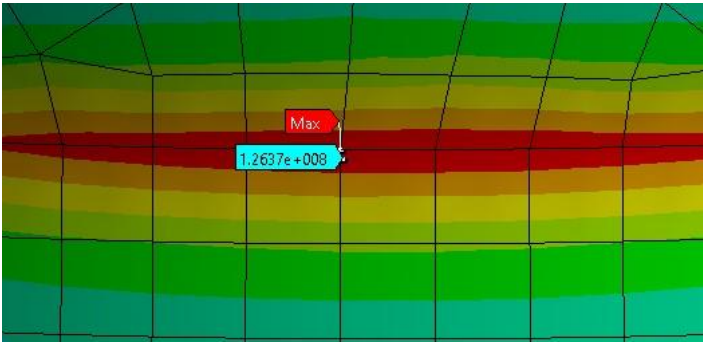
Sehingga persentase *error* yang dihasilkan yaitu:

$$\% \varepsilon = \left[\frac{(\text{Hasil Simulasi} - \text{Hasil Perhitungan})}{\text{Hasil Simulasi}} \right] \times 100$$

$$\% \varepsilon = \left[\frac{(1.3183 \times 10^8) - (1.264 \times 10^8)}{1.3183 \times 10^8} \right] \times 100$$

$$\% \varepsilon = 4.119\%$$

Berdasarkan *error* antara hasil simulasi dengan *hand-calculation* yang didapat yaitu kurang dari 5%, dapat disimpulkan bahwa pemodelan yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah valid.



Gambar 3.31 Perbandingan Hasil Simulasi dan *Hand-Calculation*

3.8 Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan *timeline* sebagai berikut:

Kegiatan	Juli				Agustus				September				Oktober				November				Desember				Januari			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur																												
Pengumpulan Data																												
Pemodelan Geometri																												
Meshting																												
Penulisan Proposal Tugas Akhir																												
Seminar Proposal Tugas Akhir																												
Simulasi																												
Penulisan Laporan Tugas Akhir																												
Sidang Tugas Akhir																												

Gambar 3.32 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Kelelahan

Analisis kelelahan struktur akibat ketiga pembebanan didapatkan dengan sebelumnya menghitung kerusakan akibat masing-masing pembebanan. Analisis kerusakan tersebut antara lain:

4.1.1 Analisis Kerusakan akibat Beban Gelombang

Beban gelombang yang bekerja pada *jacket leg* menyebabkan anjungan lepas pantai terpancang mengalami dua mode gerakan rotasional, yaitu *heel* dan *trim*. Kedua gerakan tersebut menyebabkan timbulnya momen inersia yang bekerja pada *crane base* dan dapat dihitung dengan persamaan $M = I \times \alpha$, dimana α adalah besar percepatan pada *crane base*.

Berdasarkan Gambar 2.16 sub-bab (2.2.4.3) mengenai percepatan horizontal dan sudut inklinasi berdasarkan lokasi penempatan *crane*, anjungan terpancang dengan sudut inklinasi yang tidak melebihi masing-masing 0.5° arah *heel* dan *trim* mengalami percepatan sebesar 0.0 ft/s^2 , sesuai yang telah disyaratkan oleh *API-2C*. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tidak ada momen yang terjadi pada *crane base* akibat pergerakan anjungan. Hal ini menunjukkan bahwa beban gelombang mengakibatkan kemungkinan terjadinya pergerakan pada anjungan lepas pantai terpancang serta kontribusi pembebanan tersebut pada pengurangan umur kelelahan *jacket leg* anjungan, namun tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap umur kelelahan *crane pedestal*.

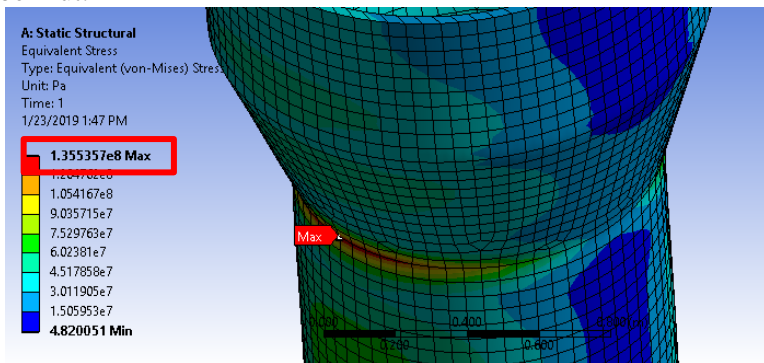
4.1.2 Analisis Kerusakan akibat Beban Angin

Kerusakan pada struktur *crane pedestal* akibat pembebanan angin dianalisis dengan melakukan simulasi statis untuk mencari nilai *Equivalent (von-Mises) Stress* sebagai dasar pembebanan siklik. Selanjutnya dilakukan simulasi dinamis dengan siklus

tertentu untuk mendapatkan nilai *damage* maksimum dan *fatigue life* minimum dari masing-masing kondisi pembebanan. Kedua hasil simulasi dibandingkan dengan *hand-calculation* sebagai proses validasi. Selanjutnya akan dijelaskan pada sub-bab berikut.

4.1.2.1 Simulasi Statis

Analisis statis dilakukan dengan mencari nilai *Equivalent (von-Mises) Stress* pada setiap kecepatan angin sesuai dengan *load condition* 9 hingga 13 pada Tabel 3.24, dimana satu kecepatan angin pada empat elevasi berbeda dianggap terjadi pada waktu yang sama. *Equivalent (von-Mises) Stress* digunakan pada simulasi melalui *bar Solution*. Contoh hasil simulasi statis dengan nilai *Equivalent (von-Mises) Stress* terbesar yaitu pada kecepatan angin tertinggi (17.3 m/s) dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.1 Nilai *Equivalent (von-Mises) Stress* Pada Kecepatan Angin 17.3 m/s

Hasil simulasi statis pada masing-masing kecepatan angin disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 4.1 Hasil Simulasi Statis

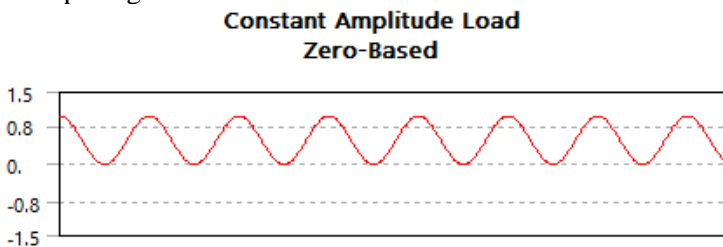
Kecepatan Angin (m/s)	<i>Equivalent (von-Mises) Stress</i> Maksimum (Pa)
5.5	1.355216E+08
8.0	1.355229E+08
10.8	1.355251E+08

Kecepatan Angin (m/s)	<i>Equivalent (von-Mises) Stress</i> Maksimum (Pa)
13.9	1.355291E+08
17.3	1.355357E+08

4.1.2.2 Simulasi Dinamis

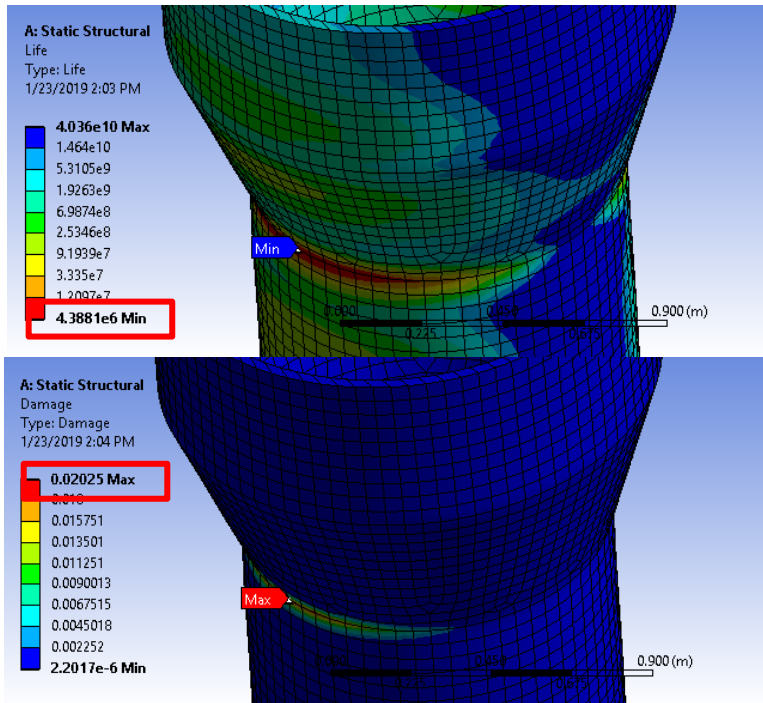
Nilai rasio kerusakan beserta umur lelahnya dapat dihitung melalui simulasi *software finite element* masing-masing dengan menggunakan *Damage* dan *Life* pada *bar Fatigue Tool*. Pada *Fatigue Tool* digunakan tipe pembebanan *Zero-Based*, karena beban angin dianggap bekerja pada struktur kemudian dihilangkan. Selanjutnya dipilih tipe analisis *Stress Life*, teori tegangan rata-rata *Gerber*, dan komponen tegangan *Equivalent (Von-mises)*. Untuk mendapatkan nilai *damage* digunakan jumlah siklus yang sebenarnya terjadi sebagai input.

Tipe pembebanan *Zero-Based* pada *fatigue tool* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.2 Tipe Pembebanan *Zero-Based*

Contoh hasil simulasi dinamis dengan nilai *damage* terbesar dan *fatigue life* terkecil yaitu pada kecepatan angin 8 m/s dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4. 3 Nilai *Life* Minimum dan *Damage* Maksimum Pada Kecepatan Angin 8 m/s

Hasil simulasi dinamis pada masing-masing kecepatan angin disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4.2 Hasil Simulasi Dinamis

Kecepatan Angin (m/s)	ni	Life Minimum (Ni)	Damage Maksimum (ni/Ni)
5.5	70,720	4.3882E+06	1.6116E-02
8	88,860	4.3881E+06	2.0250E-02
10.8	14,380	4.3879E+06	3.2772E-03
13.9	1,260	4.3875E+06	2.8718E-04
17.3	60	4.3868E+06	1.3677E-05
Total			3.9944E-02

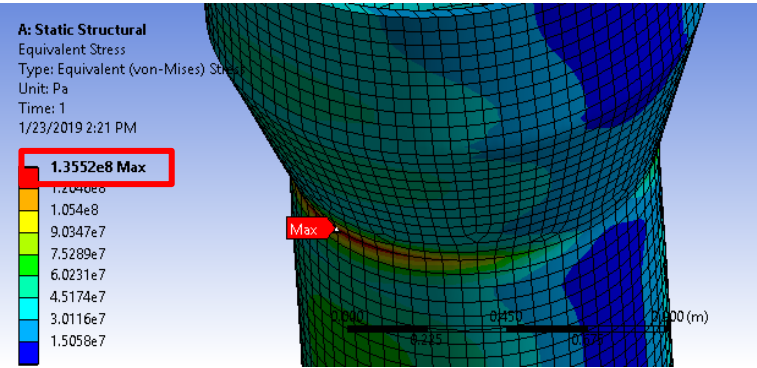
Hasil perhitungan dinamis menunjukkan total rasio kerusakan akibat beban angin *crane* pada lima kecepatan angin berbeda adalah sebesar **0.039944**.

4.1.3 Analisis Kerusakan akibat Beban Operasional Crane

Perbedaan antara analisis kerusakan akibat beban operasional dengan angin terletak pada simulasi dinamis, dimana tipe pembebanan yang digunakan adalah *Ratio*. Sehingga pada simulasi statis, dibutuhkan nilai tegangan minimum dan maksimum dari dua kondisi pembebanan berbeda, yaitu *Equivalent (von-Mises) Stress* maksimum pada saat *crane* tanpa beban sebagai tegangan minimum, dan *Equivalent (von-Mises) Stress* maksimum pada saat *crane* mengangkat beban 10 Ton sebagai tegangan maksimum. Selanjutnya akan dijelaskan pada sub-bab berikut.

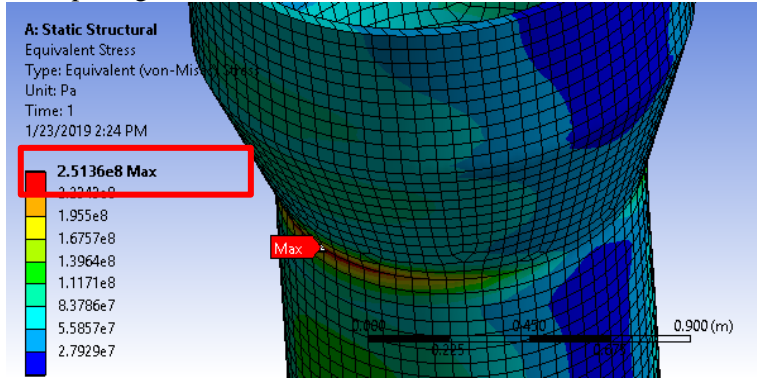
4.1.3.1 Simulasi Statis

Satu siklus pada proses operasi *crane* terdiri dari mengangkat beban dan menurunkannya. Sehingga, dilakukan dua simulasi statis yaitu mencari nilai *Equivalent (von-Mises) Stress* maksimum masing-masing kondisi pada saat *crane* tidak mengangkat beban dan saat *crane* mengangkat beban maksimum (10 Ton) sesuai dengan *load condition* 1 hingga 4 pada Tabel 3.24. Nilai *Equivalent (von-Mises) Stress* maksimum *crane* tanpa beban berdasarkan hasil simulasi statis dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.4 Equivalent (von-Mises) Stress Tanpa Beban

Sedangkan contoh hasil simulasi statis dengan nilai *Maximum Equivalent (von-Mises)* terbesar yaitu saat mengangkat beban maksimum 10 Ton dengan radius terbesar 13.7m dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.5 Equivalent (von-Mises) Stress Beban Maksimum pada Radius 13.7m

Hasil simulasi statis pada masing-masing radius disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 4.3 Hasil Simulasi Statis

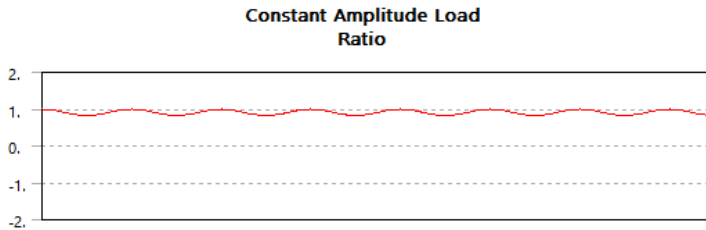
Rad- ius (m)	Tanpa Beban			Dengan Beban		
	Aksial (N)	Momen (Nm)	Max Von- Mises (Pa)	Aksial (N)	Momen (Nm)	Max Von- Mises (Pa)
3.1	231,695	1,543,297	1.3552 E+08	329,795	1,847,407	1.6333 E+08
6	231,695	1,543,297	1.3552 E+08	329,795	2,131,897	1.8741 E+08
10	231,695	1,543,297	1.3552 E+08	329,795	2,524,297	2.2063 E+08
13.7	231,695	1,543,297	1.3552 E+08	329,795	2,887,267	2.5136 E+08

4.1.3.2 Simulasi Dinamis

Tipe pembebanan yang digunakan pada simulasi dinamis pembebanan operasional adalah *Ratio*. Rasio yang digunakan yaitu perbandingan antara tegangan minimum dan maksimum, sesuai dengan Persamaan (2.9), dimana nilai tegangan minimum merupakan *Equivalent (von-Mises) Stress* maksimum pada saat *crane* tanpa beban, sedangkan tegangan maksimum merupakan *Equivalent (von-Mises) Stress* maksimum pada saat *crane* mengangkat beban 10 Ton. Contoh perhitungan rasio pada radius 3.1m adalah sebagai berikut:

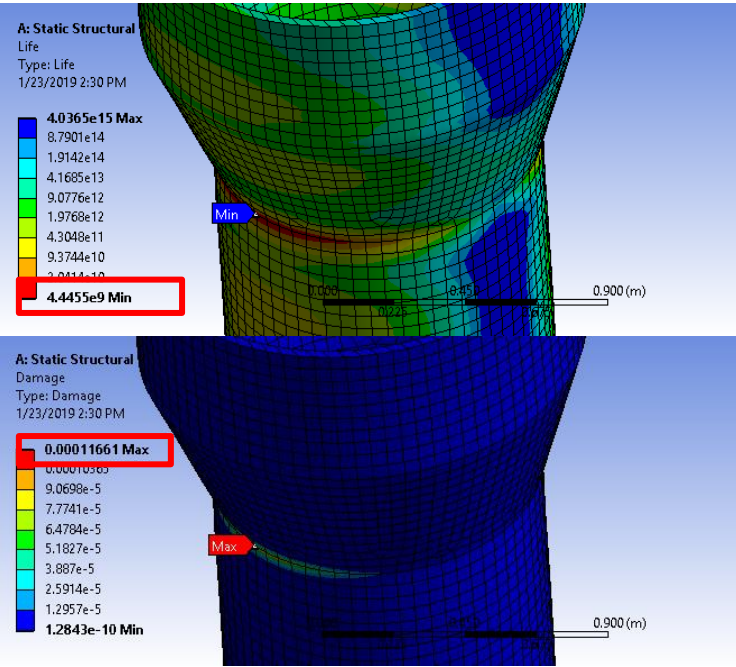
$$\begin{aligned}
 R &= \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \\
 &= \frac{1.3552 \times 10^8}{1.6333 \times 10^8} \\
 &= 0.8297
 \end{aligned}$$

Tipe pembebanan *Ratio* (R=0.8297) pada *Fatigue Tool* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.6 Tipe Pembebanan *Ratio* ($R=0.8297$)

Rasio ini kemudian digunakan pada simulasi dinamis untuk menghitung *life* dan *damage* dengan menggunakan kondisi pembebanan *crane* mengangkat beban maksimum. Masing-masing rasio digunakan pada empat kondisi pembebanan dengan radius berbeda, sesuai dengan tegangan minimum dan maksimum yang terjadi pada radius tersebut. Pada *bar Fatigue Tool* dipilih tipe analisis *Stress Life*, teori tegangan rata-rata *Gerber*, dan komponen tegangan *Equivalent (von-Mises)*. Contoh hasil simulasi dinamis dengan nilai *life* terkecil dan *damage* terbesar yaitu pada radius terbesar (13.7m) dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.7 Nilai *Life* Minimum dan *Damage* Maksimum Pada Radius 13.7m

Hasil simulasi dinamis pada masing-masing radius disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4.4 Hasil Simulasi Dinamis

Radius (m)	Rasio	ni (cycle/tahun)	Ni (Min Life)	ni/Ni (Max Damage)
3.1	0.82973	581,400	4.4455E+09	1.1661E-04
6	0.72312	581,400	1.7790E+08	2.9140E-03
10	0.61424	581,400	1.2848E+07	4.0349E-02
13.7	0.53915	581,400	4.1860E+06	1.2384E-01
Total				1.6722E-01

Hasil simulasi dinamis menunjukkan total rasio kerusakan kumulatif akibat beban operasional *crane* pada empat radius berbeda adalah sebesar **0.16722**.

4.1.4 Analisis Kelelahan Total

Setelah didapat rasio kerusakan akibat masing-masing pembebanan gelombang, angin, dan operasional, ketiga rasio kerusakan tersebut dijumlahkan untuk mendapatkan rasio kerusakan kumulatif total.

$$\begin{aligned}\sum D &= D_{gelombang} + D_{angin} + D_{operasional} \\ &= 0 + 0.039944 + 0.16722 \\ &= 0.20716\end{aligned}$$

Umur kelelahan struktur dapat dihitung dengan membagi umur desain struktur *crane pedestal* dengan nilai rasio kerusakan kumulatif total.

$$\begin{aligned}Lf &= \frac{20}{D} \\ &= \frac{20}{0.164867} \\ &= 96.54 \text{ tahun}\end{aligned}$$

Dengan umur kelelahan 96.54 tahun maka *safety factor* dari struktur *crane* pada anjungan adalah sebesar:

$$\begin{aligned}SF &= \frac{Fatigue\ life}{Design\ life} \\ &= \frac{96.54}{20} \\ &= 4.827\end{aligned}$$

Anjungan terpancang memiliki umur desain 20 tahun. Berdasarkan *API RP2A*, umur desain anjungan dengan memperhitungkan *safety factor* 5.0 adalah 100 tahun. Berdasarkan hasil perhitungan yang didapatkan pada tugas akhir ini, *crane* tersebut layak dioperasikan karena memiliki *fatigue life* mendekati *fatigue life* anjungan terpancang, yaitu 96.54 tahun.

4.2 Kontribusi Pengaruh Pembebanan

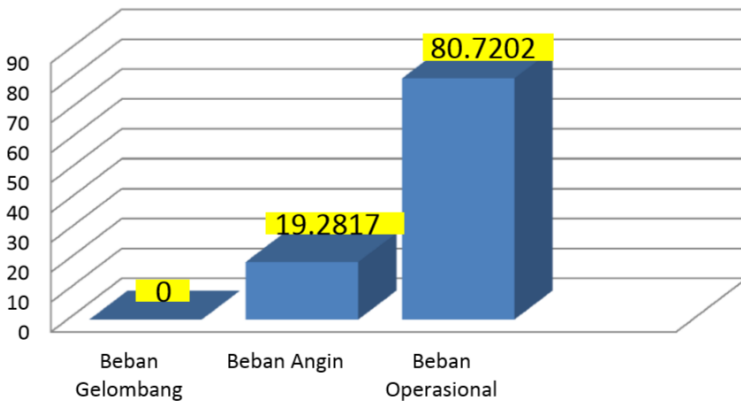
Dari hasil analisis, diketahui besar pengaruh masing-masing pembebanan terhadap umur kelelahan *crane pedestal*. Besar pengaruh beban tersebut disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4.5 Persentase Kontribusi Pembebanan terhadap Kelelahan Struktur *Crane Pedestal*

Beban	Kontribusi
Gelombang	0%
Angin	19.2817%
Operasional	80.7202%

Dalam bentuk histogram, pengaruh masing-masing pembebanan disajikan pada gambar berikut:

Kontribusi Pembebanan terhadap Kelelahan



Gambar 4.8 Histogram Kontribusi Pembebanan terhadap Kelelahan Struktur *Crane Pedestal*

Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan bahwa kelelahan yang terjadi pada struktur *crane pedestal* akibat beban siklik paling besar dipengaruhi oleh beban operasional yaitu sebesar 80.7202%, yang berikutnya oleh beban angin sebesar 19.2817%, dan beban gelombang tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kelelahan struktur *crane pedestal* pada anjungan terpancang.

4.3 Komparasi Hasil Analisis Kelelahan Struktur *Crane Pedestal*

Berikut ini adalah komparasi dari data serta analisis pembebanan antara batasan desain manufaktur *crane* pada anjungan terpancang sebagai obyek tugas akhir ini, pembebanan pada *crane* yang sebenarnya, serta penelitian sebelumnya dengan obyek penelitian *crane* pada *Floating Production, Storage, and Offloading* (FPSO).

Tabel 4.6 Komparasi Data dan Analisis Pembebanan *Crane*

Parameter	Anjungan Terpancang Batasan Desain	Anjungan Terpancang Tugas Akhir Ini	FPSO Penelitian Sebelumnya
<i>Design life</i>	20 Tahun	20 Tahun	30 Tahun
Pengaruh beban gelombang terhadap obyek penelitian	Sudut inklinalasi tidak melebihi 0.5°	Sudut inklinalasi 0.054° dan percepatan 0.0 m/s²	Percepatan 1.456 m/s² arah <i>heave</i> dan 3.389 rad/s² arah <i>roll</i>
Kecepatan angin	<i>Crane operating wind speed</i> 28.3 m/s	28.11 m/s	14.08 m/s
Gaya akibat beban angin	Max 31,000 N	3,804.57 N	1,456.25 N
Beban angkat	SWL 5 Ton	10 Ton (SF=2.0)	50 Ton
Gaya aksial akibat beban operasional	Max 370,000 N	329,795 N	2,953,352 N
Momen gaya akibat beban operasional	Max 3,200,000 Nm	2,887,267 Nm	2,448,580 Nm

Sedangkan komparasi hasil analisis antara *crane* pada anjungan terpancang sebagai obyek penelitian tugas akhir ini

dengan *crane* pada FPSO sebagai obyek penelitian sebelumnya disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 4.7 Komparasi Hasil Analisis

Hasil Analisis	Anjungan Terpancang	FPSO
Rasio kerusakan akibat beban gelombang	0.00	0.269
Rasio kerusakan akibat beban angin	0.03994	7.22E-10
Rasio kerusakan akibat beban operasional	0.16722	0.00593
Total rasio kerusakan kumulatif	0.20716	0.2749
Estimasi umur kelelahan	96.54 Tahun	109.309 Tahun
<i>Safety Factor</i>	4.827	3.644
Kontribusi beban gelombang terhadap kelelahan struktur	0%	97.839%
Kontribusi beban angin terhadap kelelahan struktur	19.2817%	0.000000263%
Kontribusi beban operasional terhadap kelelahan struktur	80.7202%	2.161%

4.4 Pembahasan

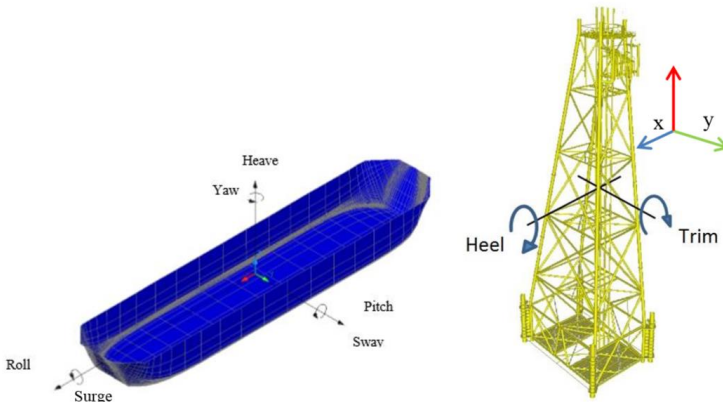
Pada sub-bab ini akan dijelaskan lebih dalam mengenai perbedaan penelitian sebelumnya dengan tugas akhir ini terkait dengan pembebanan gelombang, serta hasil simulasi beban angin dan operasi pada struktur *crane pedestal* di anjungan terpancang.

4.4.1. Komparasi Pembebanan Gelombang

Seerti yang telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, perbedaan terbesar antara penelitian terdahulu dengan tugas akhir ini terletak pada pembebanan gelombang, dimana pada penelitian terdahulu didapat kontribusi beban gelombang terhadap kelelahan struktur sebesar 97%, sedangkan pada tugas akhir ini sebesar 0%.

Salah satu penyebab perbedaan hasil yang signifikan ini dapat dijelaskan dengan melihat karakteristik pembebanan gelombang pada struktur yang dianalisis.

Pada penelitian sebelumnya dengan obyek penelitian FPSO, beban gelombang bekerja langsung pada struktur FPSO, sehingga menyebabkan FPSO mengalami pergerakan. Dikutip dari penelitian sebelumnya oleh Muammar Kadhafi (2011) dengan judul penelitian *Studi Kelelahan Crane Pedestal FPSO Belanak Akibat Respon Dinamik Gerakan Beban Angkat pada Crane*, benda yang mengapung, dalam hal ini FPSO, mempunyai enam mode gerakan bebas [SDOF (*Six Degree of Freedom*)] yang terbagi menjadi dua jenis yaitu tiga mode gerakan translasional dan tiga mode gerakan rotasional (Bhattacharyya, 1978). Keenam mode gerakan tersebut antara lain *surge* (gerakan transversal arah sumbu x), *sway* (arah sumbu y), *heave* (arah sumbu z) untuk mode gerak translasional, dan *roll* (gerakan rotasional arah sumbu x), *pitch* (arah sumbu y), *yaw* (arah sumbu z) untuk mode gerak rotasional. Sedangkan pada anjungan terpancang, hanya ada satu jenis mode gerakan bebas yaitu rotasional, dengan mode gerakan *heel* (gerakan rotasional arah sumbu x) dan *trim* (arah sumbu y).

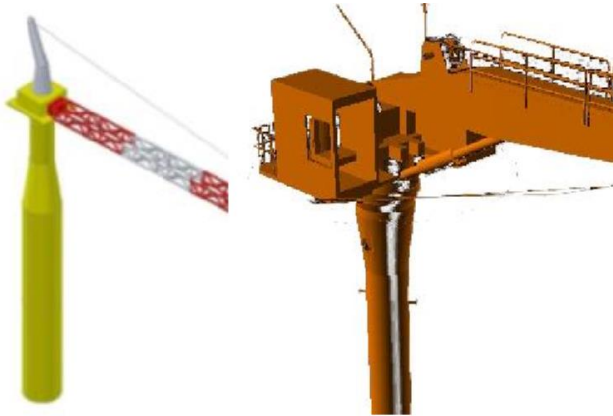


Gambar 4.9 Komparasi Mode Gerakan Bebas FPSO Belanak dengan Anjungan Terpancang

Perbedaan mode gerakan bebas antara FPSO Belanak dengan anjungan terpancang dapat mempengaruhi umur kelelahan struktur *crane pedestal*. Semakin banyak mode gerakan bebas yang dialami obyek penelitian, maka intensitas ayunan yang terjadi pada beban yang diangkut *crane* akan meningkat.

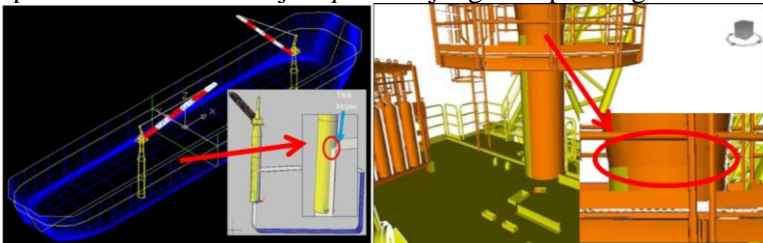
Selain mode gerakan bebas, percepatan yang dialami oleh struktur pada FPSO Belanak juga lebih besar dibandingkan pada anjungan terpancang. Hal ini telah dijelaskan pada *API-2C* dimana pada *crane* di FPSO, percepatan yang terjadi dipengaruhi oleh tinggi gelombang signifikan, sementara pada anjungan terpancang, beban gelombang hanya menyebabkan sudut inklinasi pada *crane pedestal*, namun tidak menyebabkan percepatan yang berpengaruh secara signifikan terhadap umur kelelahan struktur. Semakin besar percepatan dari pergerakan *crane*, maka reaksi akibat gaya inersia pada tumpuan *crane pedestal* akan semakin besar, sehingga kerusakan yang terjadi pun bertambah. Kerusakan yang besar akan turut mengurangi umur kelelahan struktur.

Perbedaan lainnya juga terdapat pada titik kritis yang dianalisis. Pada penelitian sebelumnya, titik kritis terletak pada sambungan *crane pedestal* dengan dek FPSO Belanak. Sedangkan pada tugas akhir ini, titik kritis terletak pada *neck* dari *pedestal*. Hal ini terjadi akibat perbedaan model *pedestal crane* yang dianalisis.



Gambar 4.10 Komparasi Struktur *Crane Pedestal* pada FPSO Belanak dengan Anjungan Terpancang

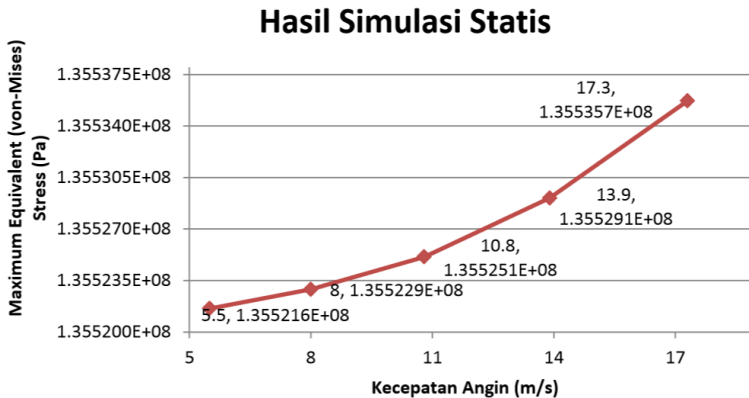
Pada penelitian sebelumnya, terjadi perbesaran diameter pada sambungan antara bagian atas *crane* dengan *pedestal* nya. Sedangkan pada tugas akhir ini, terjadi pengecilan diameter pada sambungan antara bagian atas *crane* dengan *pedestal*. Menurut analisis, pada tugas akhir ini titik kritis terjadi pada *neck* akibat pengecilan diameter tersebut. Penambahan nilai tegangan diakibatkan oleh adanya *Stress Concentration Factor* (SCF) pada saat pengecilan diameter. Akibatnya, pembebanan dari atas *crane* terpusat pada bagian *pedestal* yang diameternya mengecil. Hal ini dilakukan untuk mengurangi distribusi pembebanan dari operasional *crane* menuju *topside* anjungan terpancang.



Gambar 4.11 Komparasi Titik Tinjau Kelelahan *Crane Pedestal* pada FPSO Belanak dengan Anjungan Terpancang

4.4.2. Hasil Simulasi Beban Angin

Hasil simulasi statis beban angin dalam bentuk grafik dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.12 Grafik Kecepatan Angin v.s *Maximum Equivalent (von-Mises) Stress*

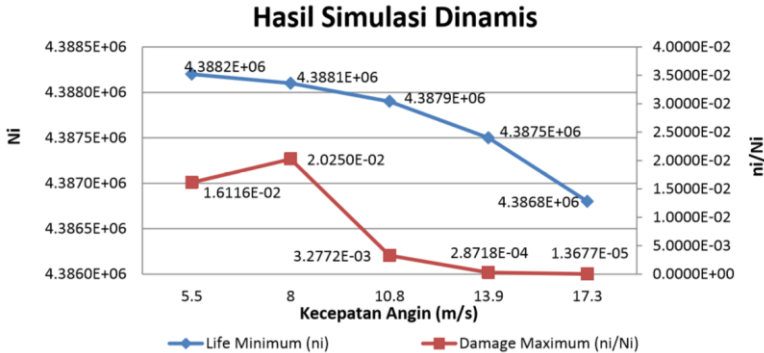
Dari grafik hasil simulasi statis, dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan angin maka tegangan yang terjadi pada struktur akan semakin besar. Hal ini dapat dibuktikan dengan Persamaan (2.3), dimana gaya angin pada struktur berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan angin.

Kecepatan angin yang mengenai struktur beserta jumlah kejadian angin dalam 20 tahun dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.13 Grafik Kecepatan Angin Bersama Jumlah Kejadian Dalam 20 Tahun

Sedangkan untuk grafik hasil simulasi dinamis dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.14 Grafik Life Minimum dan Damage Maksimum Berdasarkan Jumlah Siklus

Dari grafik hasil simulasi dinamis, dapat dilihat bahwa tidak ada hubungan antara nilai *life* minimum dengan jumlah siklus pembebanan yang terjadi. Nilai *life* minimum terus berkurang walaupun jumlah siklus bertambah maupun berkurang kembali. Hal ini dikarenakan nilai *life* minimum (N_i) didapatkan berdasarkan nilai *Equivalent (von-Mises) Stress* (S_i), dan tidak dipengaruhi oleh jumlah siklus (n_i).

Sedangkan grafik *damage* maksimum (n_i/N_i) menunjukkan bahwa terdapat pengaruh jumlah siklus terhadap nilai *damage*. Dapat disimpulkan bahwa ketika siklus suatu pembebanan pada struktur ditambah, maka kerusakan yang terjadi pada struktur tersebut akan semakin besar, begitu pula sebaliknya, sesuai dengan Persamaan (2.15) dimana nilai *damage* berbanding lurus dengan jumlah siklus yang terjadi.

Tabel berikut menunjukkan perbandingan hasil analisis pembebanan angin *crane* pada anjungan terpancang pada tugas akhir ini dengan FPSO pada penelitian sebelumnya:

Tabel 4.8 Komparasi Hasil Analisis Pembebanan Angin

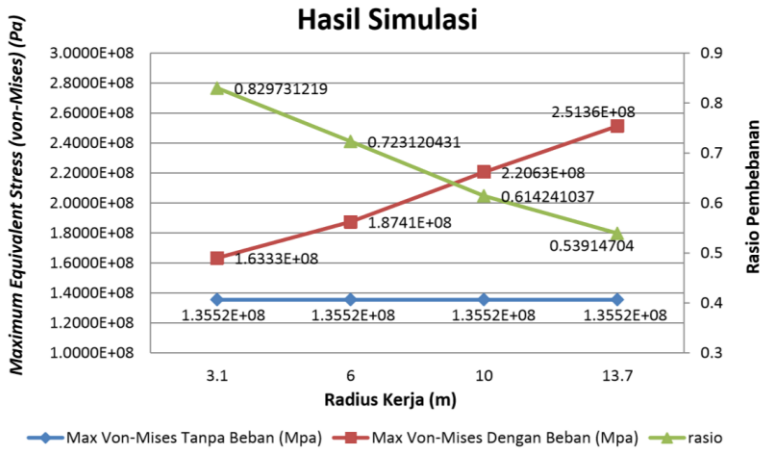
Pembebanan Angin	Anjungan Terpancang	FPSO
Kecepatan maksimum	28.11 m/s	14.08 m/s
Gaya maksimum	3,804.57 N	1,456.25 N
Rasio kerusakan	0.048577	7.22E-10
Kontribusi terhadap kelelahan struktur	19.2817%	0.000000263%

Perbedaan yang sangat besar antara nilai rasio kerusakan akibat beban angin serta kontribusinya terhadap kelelahan struktur pada tugas akhir ini dan penelitian sebelumnya adalah nilai pembebanan yang ditinjau. Pada tugas akhir ini, beban angin menambah tegangan yang terjadi dengan memperhitungkan juga tegangan akibat *self-weight* dari *crane*. Sehingga momen yang terjadi selama beban angin bekerja pada *crane* adalah momen akibat gaya angin ditambah dengan momen akibat berat *crane* itu sendiri. Sedangkan pada penelitian sebelumnya, beban yang ditinjau hanya gaya akibat tekanan angin, tanpa memperhitungkan *self-weight* dari *crane*.

Perbedaan nilai kontribusi yang besar pada tugas akhir ini juga disebabkan oleh kecepatan angin yang jauh lebih besar yang terjadi pada daerah anjungan terpancang, dibandingkan dengan kecepatan angin maksimum pada daerah dimana FPSO beroperasi. Seperti yang sudah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya, kecepatan angin yang besar akan menghasilkan gaya dan tegangan yang besar, ditambah dengan jumlah siklus yang besar juga maka akan menambah kerusakan yang terjadi. Sehingga pada daerah dengan kecepatan angin yang rendah, gaya angin tidak menjadi penyebab utama suatu struktur mengalami kelelahan.

4.4.3. Hasil Simulasi Beban Operasional

Hasil simulasi statis dan dinamis beban operasional dalam bentuk grafik dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.15 Grafik Radius v.s *Maximum Equivalent (von-Mises) Stress* dan Rasio

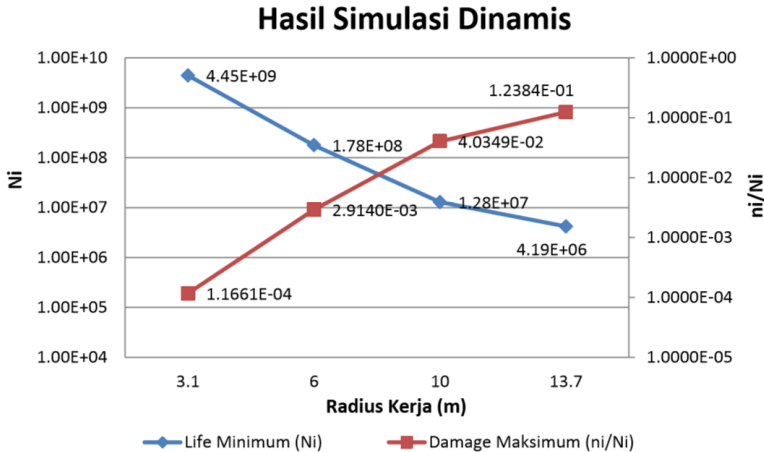
Dari grafik hasil simulasi statis, dapat dilihat bahwa nilai *Maximum Equivalent (von-Mises) Stress* yang terjadi pada struktur *crane pedestal* saat *crane* mengangkat beban berbanding lurus terhadap radius. Semakin besar radius kerja pada suatu siklus pengangkatan beban, maka tegangan yang terjadi pada struktur akibat beban angkat akan semakin besar. Hal ini dapat dibuktikan dengan Persamaan (2.5), dimana momen akibat beban angkat berbanding lurus dengan lengan gaya yaitu radius kerja *crane*. Selain itu nilai momen juga dipengaruhi oleh *self-weight* dari *crane*, dengan jarak dari titik berat ke sumbu *crane* sebagai lengan gaya.

Berbeda dengan tegangan yang terjadi pada saat *crane* tidak mengangkat beban, tegangan yang terjadi bernilai konstan, dan tidak dipengaruhi oleh perubahan radius kerja. Sehingga momen yang terjadi pada struktur hanya diakibatkan oleh *self-weight*, dengan lengan gaya yang bernilai konstan.

Selanjutnya, pada simulasi dinamis didapatkan rasio berdasarkan masing-masing nilai tegangan yang telah didapat dari simulasi statis. Grafik di atas menunjukkan nilai rasio yang

semakin menurun seiring dengan bertambahnya nilai tegangan maksimum. Hal ini dapat dibuktikan dengan Persamaan (2.9), dimana nilai rasio berbanding terbalik dengan tegangan maksimum.

Sedangkan grafik dari nilai *life* dan *damage* hasil simulasi dinamis dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.16 Grafik *Life* Minimum dan *Damage* Maksimum Berdasarkan Rasio

Pada Persamaan (2.9), nilai tegangan maksimum berbanding terbalik dengan nilai rasio, dimana perubahan nilai rasio hanya dipengaruhi oleh tegangan maksimum yaitu *Equivalent Stress (von-Mises)* maksimum saat *crane* mengangkat beban dikarenakan tegangan minimum pada simulasi beban operasional yang bernilai konstan. Sedangkan nilai tegangan maksimum sebagai S_i berbanding terbalik dengan nilai *life* minimum sebagai N_i . Sehingga dapat dilihat pada grafik hasil simulasi dinamis bahwa nilai rasio berbanding lurus dengan nilai *life* minimum (N_i).

Sedangkan grafik *damage* maksimum (n_i/N_i) menunjukkan nilai rasio berbanding terbalik dengan kerusakan struktur. Dapat disimpulkan bahwa pada suatu siklus pembebanan, semakin besar

perbedaan nilai antara tegangan minimum dan tegangan maksimum yang terjadi pada struktur tersebut maka kerusakan yang terjadi akan semakin besar.

Tabel berikut menunjukkan perbandingan hasil analisis pembebanan angin *crane* pada anjungan terpancang pada tugas akhir ini dengan FPSO pada penelitian sebelumnya:

Tabel 4.9 Komparasi Hasil Analisis Pembebanan Operasional

Hasil Analisis	Anjungan Terpancang	FPSO
Beban angkat	10 Ton	50 Ton
Gaya aksial maksimum	329,795 N	2,953,352 N
Momen gaya maksimum	2,887,276 Nm	2,448,580 Nm
Rasio kerusakan	0.16722	0.00593
Kontribusi terhadap kelelahan struktur	80.7202%	2.161%

Pada penelitian sebelumnya, gaya aksial dan momen gaya maksimum yang terjadi pada struktur *crane* jauh lebih besar dibandingkan dengan *crane* pada tugas akhir ini. Hal ini disebabkan oleh ukuran dan *self-weight* dari *crane* pada tugas akhir ini yang jauh lebih kecil, dengan kapasitas angkat yang juga jauh lebih kecil. Selain itu lebar jangkauan *boom* pada penelitian sebelumnya lebih panjang, sehingga momen yang terjadi juga lebih besar.

Perbedaan yang sangat besar antara nilai rasio kerusakan akibat beban operasi serta kontribusinya terhadap kelelahan struktur pada tugas akhir ini dan penelitian sebelumnya adalah besar beban angkat beserta jumlah siklus masing-masing *crane*. Pada tugas akhir ini, beban angkat yang digunakan mempertimbangkan *Safety Factor* $SF=2.0$, sehingga beban angkat yang digunakan adalah dua kali lipat lebih besar dari *Safe Working Load* $SWL=5$ Ton. Selain itu, siklus mengangkat dan menurunkan beban angkat diasumsikan terjadi setiap jam dalam 20 tahun, dimana setiap siklus mengangkat beban terberat dan dibagi pada empat radius kerja berbeda. Hal ini dilakukan untuk memperkirakan kemungkinan *crane* mendapatkan tegangan

maksimum yang melebihi kapasitas *crane* tersebut selama masa operasi, sehingga *fatigue life* yang didapat adalah *life* paling minimal. Sedangkan pada penelitian sebelumnya, beban angkat serta siklus operasi yang digunakan dalam penelitian adalah kondisi aktual dengan lama rekam data 30 tahun. Hal ini dilakukan untuk memperkirakan sisa umur FPSO selanjutnya berdasarkan data pemakaian *crane* selama 30 tahun belakangan.

Kontribusi beban operasi terhadap beban kelelahan dengan nilai yang berbeda jauh antara tugas akhir ini dengan penelitian sebelumnya dikarenakan pada penelitian sebelumnya, kelelahan yang terjadi lebih didominasi oleh beban gelombang (97.839%).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis kelelahan yang telah dilakukan terhadap *pedestal crane* pada anjungan terpancang dengan menggunakan metode dan *software finite element* beserta *solid modeling* yang telah dijelaskan sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Beban yang mempengaruhi umur kelelahan *crane pedestal* pada anjungan terpancang diurutkan dari yang memiliki pengaruh terbesar adalah beban operasional dan beban angin. Sedangkan untuk beban gelombang hanya mempengaruhi anjungan terpancang, namun pergerakan yang terjadi pada anjungan tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kelelahan struktur *crane pedestal*.
2. Kontribusi pengaruh masing-masing pembebanan terhadap kelelahan yang terjadi pada struktur *crane pedestal* yaitu beban operasional sebesar 80.7202%, beban angin sebesar 19.2817%, dan beban gelombang sebesar 0%.
3. Estimasi umur kelelahan paling minimal dari struktur *crane pedestal* yaitu 96.54 tahun atau mendekati 5 kali umur desain, sesuai dengan perancangan anjungan terpancang dengan umur desain digunakan *safety factor* $SF=5.0$.
4. Perbedaan terbesar hasil analisis antara tugas akhir ini dengan penelitian sebelumnya terletak pada kontribusi beban gelombang, dimana pada penelitian sebelumnya beban gelombang pada FPSO memiliki kontribusi terhadap kelelahan struktur *crane* terbesar (97.839%).
5. Pada pembebanan angin dan operasional, perbedaan antara penelitian sebelumnya dengan tugas akhir ini disebabkan oleh adanya perbedaan kecepatan angin pada daerah anjungan terpancang dan FPSO beroperasi, ukuran dan berat masing-masing *crane*, dan besar beban angkat beserta jumlah siklusnya.

5.2 Saran

Dari hasil analisis yang telah dilakukan dalam tugas akhir ini, saran yang penulis berikan sebagai penyempurnaan dalam penelitian selanjutnya yaitu:

1. Dilakukan penelitian lanjutan yang lebih difokuskan pada pengaruh beban gelombang terhadap kelelahan anjungan terpancang.
2. Analisis beban angin ditinjau dari delapan arah mata angin sesuai dengan kondisi aktualnya, serta memperhitungkan getaran akibat *Vortex-Induced Vibration* (VIV).
3. Perlu ditinjau tegangan pada *crane pedestal* akibat pergerakan beban pada selama proses operasi yang disebabkan oleh gaya angin maupun berat dari beban itu sendiri.
4. Melakukan pemodelan struktur *pedestal* dengan memperhitungkan pengaruh las yang digunakan pada titik kritis untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

5.3 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini telah diusahakan untuk dilaksanakan sesuai dengan prosedur ilmiah, namun masih memiliki keterbatasan yaitu:

1. Kurva S-N yang digunakan dalam perhitungan kelelahan struktur *crane pedestal* adalah kurva untuk *plate to tubular joints* yang lebih cocok digunakan untuk titik *crane* pada bagian sambungan *pedestal* ke dek anjungan. Sehingga penggunaan kurva tersebut untuk analisis titik kritis yaitu pada bagian *neck* dari *pedestal* kurang tepat.

DAFTAR PUSTAKA

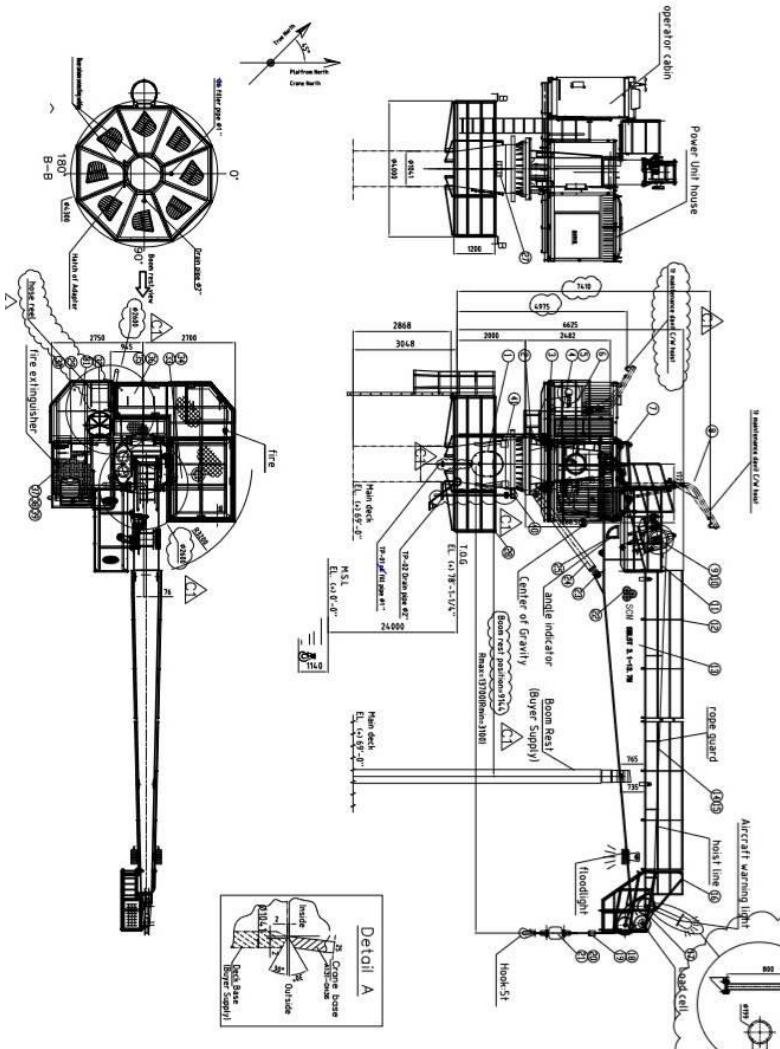
- ABS Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units. 2001. "*Part 3: Hull Construction and Equipment*". Houston, American Bureau of Shipping.
- Abizar, Reza Muhammad. 2008. "Perencanaan Pipa dan *Expansion Spool* pada Pipa Penyalur SPM". Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Adi Wirawan Husodo, Muhamad Ari, Ryandi Permana Putra. 2015. "Analisis Kekuatan Struktur dan Estimasi *Fatigue Life* Pada Konstruksi *Container Crane* Tipe RTG Berkapasitas SWL 35 Ton". Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Desain dan Manufaktur, Politeknik Perkapalan Negeri, Surabaya.
- AISC Allowable Stress Design and Plastic Design. 1989. "*Specification for Structural Steel Buildings*". Chicago, American Institute of Steel Construction, Inc.
- Akuan, Abrianto. 2007. "Diktat Kuliah Kelelahan Logam". Jakarta, Universitas Jenderal Ahmad Yani.
- Andri Kurniawan Wicaksono, Eko Budi Djatmiko, Handayanu. 2010. "Analisis Keandalan *Scantling Support Structure System Gas Processing Module FPSO* Belanak Terhadap Beban Kelelahan". Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Annelya, Wistie, dan Andojo Wurjanto. 2008. "Analisis Struktur Anjungan Lepas Pantai Tipe Tetap Jenis Tripod di Selat Makassar". Bandung, Institut Teknologi Bandung.
- Anonim. "*Fatigue Life Evaluation*" [PowerPoint Slide]. Diambil dari: http://www.public.iastate.edu/~e_m.424/Fatigue.pdf
- Anonim. "Laporan Tugas Akhir: *Risk Based Underwater Inspection* Untuk Area Platform" [Dokumen PDF]. Diambil dari: <http://digilib.itb.ac.id/files/disk1/555/jbptitbpp-gdl-ranjarach-27704-5-2007ta-4.pdf>

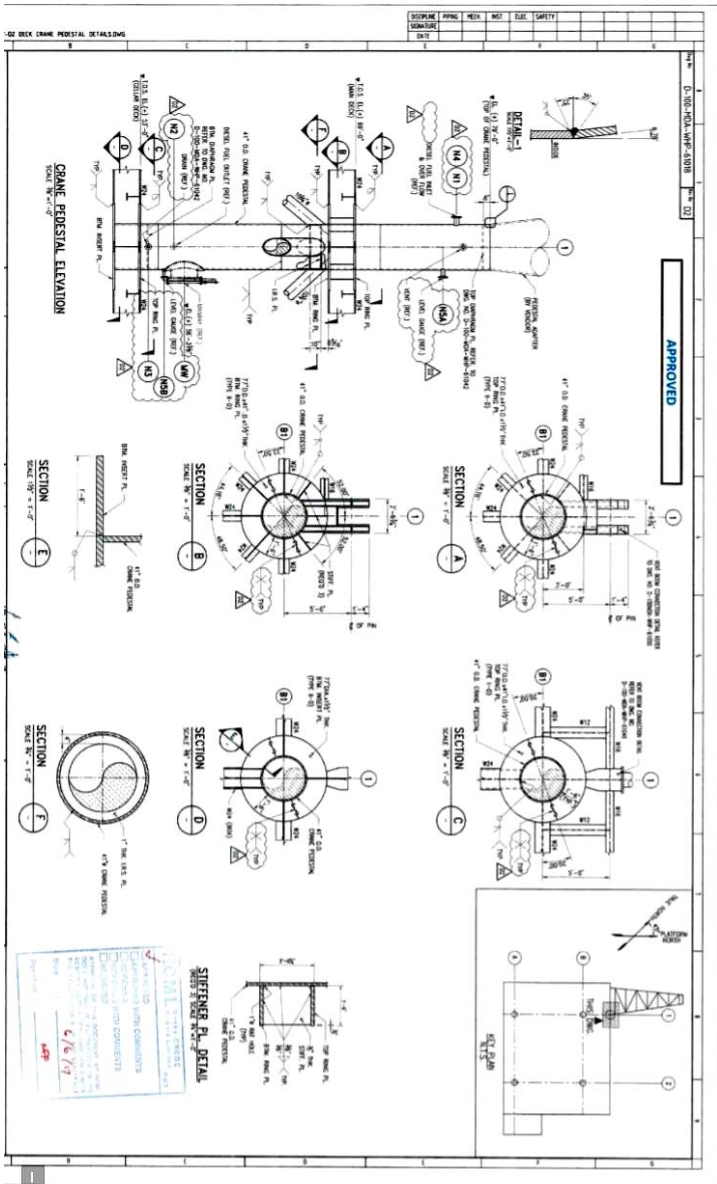
- Anonim. “*Lecture 15A.2: Loads (I): Introduction and Environmental Loads*” [Dokumen PDF]. Diambil dari: http://www.engr.mun.ca/~sbruneau/teaching/8751ocean/15A_2_EnvironmentEn%20Loads.pdf
- Anonim. “Tegangan Normal dan Tegangan Geser” [Dokumen PDF]. Diambil dari: <http://web.ipb.ac.id/~lbp/kulon/diktat/1.pdf>
- API RP 2A-WSD 21st Edition. 2000. “*Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design*”. Washington, D.C., American Petroleum Institute.
- API 2C 6th Edition. 2004. “*Specification for Offshore Pedestal Mounted Cranes*”. Washington, D.C., American Petroleum Institute.
- API 2C 7th Edition. 2012. “*Offshore Pedestal-mounted Cranes*”. Washington, D.C., American Petroleum Institute.
- Asyer Arung, Lanny D. K. Manaroinsong, dan Sjachrul Balamba. 2016. “Analisis Kelelahan Struktur Antar Tiang Pancang pada Anjungan Lepas Pantai Tipe STS di Selat Makassar dengan Metode *Fracture Mechanics*”. Laporan Tugas Akhir Jurusan Sipil, Universitas Sam Ratulangi, Manado.
- Cahyono, Hanun A.R., dan Julendra B. Ariatedja. 2018. “Analisis *Fatigue* Pada *Slewing Tower Level Luffing Crane* Berbasis Metode Elemen Hingga”. Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Chakrabarti, Subrata K.. 2005. “*Handbook of Offshore Engineering*”. Amsterdam, Elsevier Ltd.
- Dhani Trie Prasetyo, Eko Budi Djatmiko, dan Handayanu. 2010. “Keandalan *Crane Pedestal's Scantling FPSO* Belanak Terhadap Beban Kelelahan”. Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- DNV-RP-C203. 2008. “*Fatigue Design of Offshore Steel Structures*”. Høvik, Det Norske Veritas.

- DNV-RP-C205. 2010. “*Environmental Conditions and Environmental Loads*”. Høvik, Det Norske Veritas.
- DNV-RP-C206, 2006. “*Fatigue Methodology of Offshore Ships*”. Høvik, Det Norske Veritas.
- Handayanu. “Metode Elemen Hingga” [PowerPoint Slides].
Diambil dari: <http://personal.its.ac.id/files/material/2983-handayanu-oe-01.METODE%20ELEMEN%20HINGGA%20pengantar1.pdf>
- Hibbeler, R. C. 2003. “8th Edition Mechanics of Materials”. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc.
- Kadhafi, Muammar, dan Eko Budi Djatmiko. 2011. “Studi Kelelahan *Crane Pedestal FPSO* Belanak Akibat Respon Dinamik Gerakan Beban Angkat pada *Crane*”. Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Logiani, Hardy Ferrysian. 2015. “Platform: Mengenal Platform”.
Diambil dari:
<https://instrumentasipraktis.wordpress.com/2015/07/22/platform-mengenal-platform/>
- Mahardika, Yunizar Putra, Yessi Nirwana Kurniadi dan Nur Laeli Hajati. 2015. “Perancangan Struktur *Jacket* dan *Topside* Anjungan Lepas Pantai Ditinjau dari Analisis *Inplace*”. Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung.
- Mai, Tri Cao, et. al. 2011. “*Comparison of Drag and Inertia Coefficients for A Circular Cylinder in Random Waves Derived From Different Methods*”. Diambil dari:
https://www.researchgate.net/publication/49115460_COMPARISON_OF_DRAG_AND_INERTIA_COEFFICIENTS_FOR_A_CIRCULAR_CYLINDER_IN_RANDOM_WAVES_DERIVED_FROM_DIFFERENT_METHODS
- Nasution, Rudi Asnan, dan Krisnaldi Idris. 2008. “Respon Dinamik Struktur Terapung”. Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

- Nawisworo, N. 2006. “Bangunan Pantai Bab II” [Dokumen PDF].
Diambil dari:
http://eprints.undip.ac.id/34723/5/1718_CHAPTER_II.pdf
- Risanto, Puput Aryanto. 2016. “*Introduction to Offshore Oil and Gas Surface Facilities*” [PowerPoint Slide]. Diambil dari:
<https://www.slideshare.net/PuputAryanto/introduction-to-offshore-oil-and-gas-surface-facilities>
- Roberto, Poli et al. 2005. “*Encyclopaedia of Hydrocarbons: Exploration, Production and Transport, Vol.1*”. Rome, ENI: Istituto della Enciclopedia Italiana, cop.
- Srikanth, Ishwarya, M. Arockiasamy dan R. Senthil. 2016. “*Inelastic Nonlinear Pushover Analysis of Fixed Jacket-Type Offshore Platform with Different Bracing Systems Considering Soil-Structure Interaction*”. Diambil dari:
https://www.researchgate.net/publication/308303373_Inelastic_Nonlinear_Pushover_Analysis_of_Fixed_Jacket-Type_Offshore_Platform_with_Different_Bracing_Systems_Considering_Soil-Structure_Interaction

LAMPIRAN





BIODATA PENULIS



Deanna Annisa Dewi dilahirkan di Jakarta, 15 April 1996 merupakan anak pertama dari orangtua Riza Alirahman dan Listiani Dewi.

Riwayat pendidikan penulis diawali di SD Al-Azhar 20 Cibubur (2002-2008). Penulis melanjutkan pendidikannya di SMP Global Mandiri Cibubur (2008-2011), dan SMA Labschool Cibubur (2011-2014). Penulis kemudian melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi Staff Divisi HRD Mesin Music Club 2015/2016. Selanjutnya, penulis menjadi Ketua Biro Pelatihan Musik Mesin Music Club 2016/2017. Selain itu penulis juga aktif dalam kepanitiaan *event* diantaranya Mechanical City, Engine Brake, serta mengikuti lomba dan berbagai acara musik di Surabaya.

Untuk informasi dan masukan mengenai tugas akhir dapat menghubungi penulis melalui email deannanisa@gmail.com.